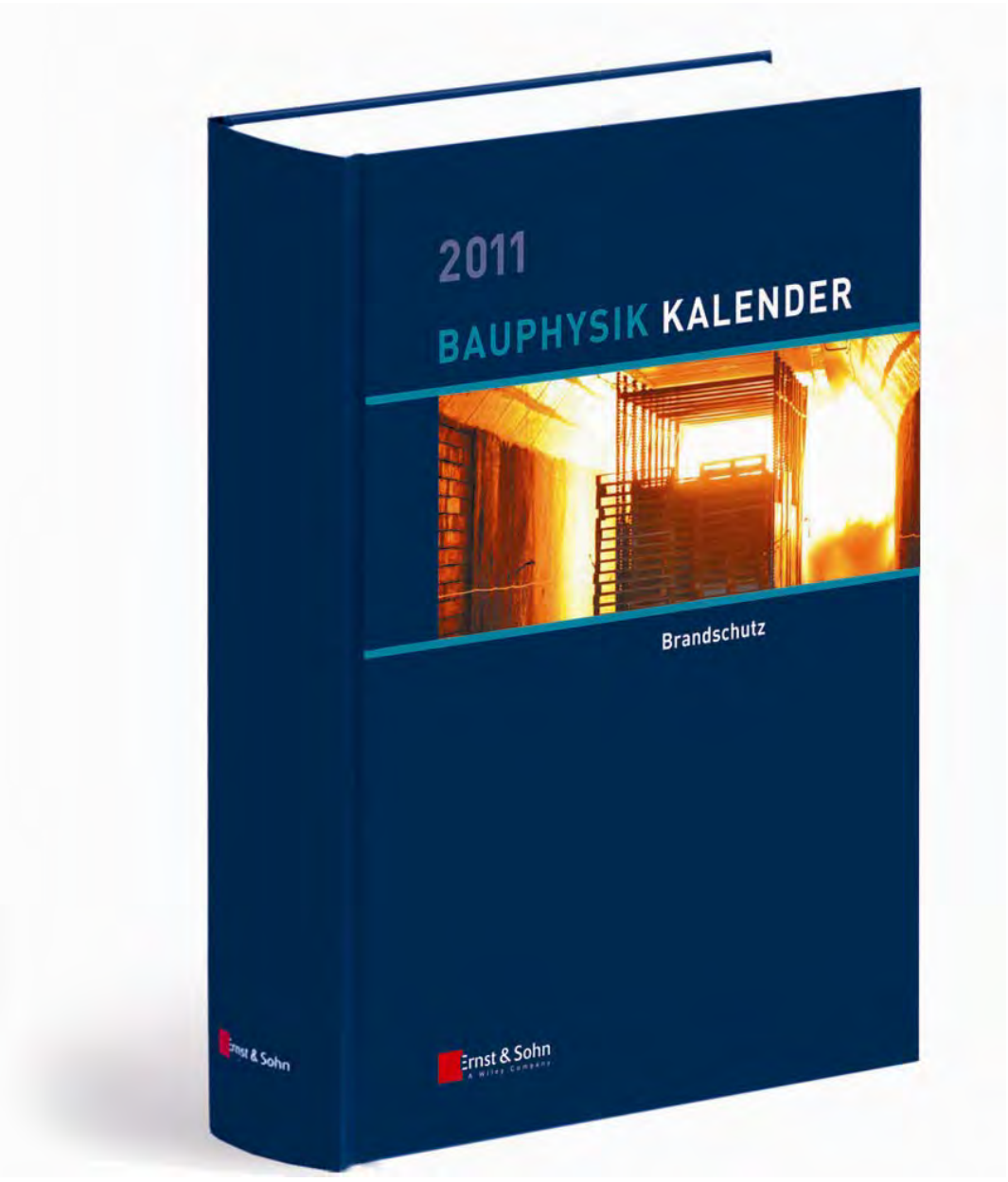
Probekapitel

Bauphysik-Kalender 2011
Schwerpunkt: Brandschutz
Herausgeber: Nabil A. Fouad
Copyright © 2011 Ernst & Sohn, Berlin
ISBN: 978-3-433-02965-7



Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften
GmbH & Co. KG
Rotherstraße 21, 10245 Berlin
Deutschland
www.ernst-und-sohn.de

C 4 Brandschutz im Industriebau

Ulrich Schneider, Marita Kersken-Bradley, Hubert Kirchberger

O. Univ.-Prof. Dr. techn. Dr. h. c. Ulrich Schneider
Technische Universität Wien
Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit
Karlsplatz 13/206, A 1040 Wien

Studium des Maschinenbaus sowie Promotion im Bauingenieurwesen (1973) und Habilitation (1978) an der Fakultät für Bauwesen der TU Braunschweig; Forschungsingenieur bei Prof. Kordina (1970–1980) im iBBB; 1981–1989 Univ.-Prof. an der Gesamthochschule, Universität Kassel, sowie Leiter der Amtlichen Betonprüfstelle F; 1990–2004 Institutsleiter des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU Wien sowie 1997–1998 Stellvertretender Leiter der Technischen Forschungs- und Versuchsanstalt (TVFA); Ehrendoktorat der Technischen Universität Brest (2004) und Ehrenmitglied der russischen Akademie für Architektur und Bauwissenschaften (2005); seit 2005 Institutsleiter des Instituts für Hochbau und Technologie der TU Wien.

Dr.-Ing. Marita Kersken-Bradley
Kersken + Kirchner GmbH
Beratende Ingenieure VBI
Pernerkreppe 11, 81925 München

Bauingenieurstudium TU München; Wissenschaftliche Assistentin am Lehrstuhl für Holzbau, TU München; Promotion 1980; Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin; Dyckerhoff Selbstständige Beratende Ingenieurin seit 1984; Öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige für Brandschutz seit 1989; Lehrbeauftragte für Brandschutz an der Technischen Universität Darmstadt und Universität Stuttgart (1990 bis 1994); Prüfsachverständige für Brandschutz gemäß der PrüfVBau Bayern seit 1999; Mitglied des PrüfVBau Prüfungsausschusses für Brandschutz; Mitglied des wissenschaftlichen Beirats Fire Safety Management der Donau Universität Krems.

Bauphysik-Kalender 2011
Herausgegeben von Nabil A. Fouad
Copyright © 2011 Ernst & Sohn, Berlin
ISBN 978-3-433-02965-7

Dipl.-Ing. Hubert Kirchberger
Technische Universität Wien
Institut für Hochbau und Technologie,
Karlsplatz 13/206-1, A-1040 Wien

Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Wien (2005), seit 2002 Projektassistent bzw. Universitätsassistent am Institut für Hochbau und Technologie der Technischen Universität Wien, Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit in der Arbeitsgruppe Brandschutz.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 217
1.1 Industriebaurichtlinie 217
1.2 DIN 18230 217
1.3 Weitere Regelwerke im Bereich des Industriebaus 217

2 Inhalte und Erläuterung der DIN 18230-1 217
2.1 Grundlagen 217
2.1.1 Äquivalente Branddauer 217
2.2 Anwendung 218
2.2.1 Erforderliche Feuerwiderstandsdauer 218
2.3 Gebäudestruktur und Nachweise 220
2.3.1 Geschosse und Ebenen 220
2.3.2 Fläche A_B des Brandbekämpfungsabschnittes 220
2.3.3 Globaler Nachweis 221
2.3.4 Teilabschnittsnachweise 221
2.3.5 Teilflächennachweise bei ungleichmäßig verteilter Brandbelastung 222
2.3.6 Teilflächennachweise bei ungleichmäßig verteiltem Wärmeabzug 222
2.3.7 Ebenennachweise 222
2.4 Rechnerische Brandbelastung 223
2.4.1 Brandlasten 223
2.4.2 Brandbelastung q 223
2.4.3 Rechnerische Brandbelastung q_R und Abbrandfaktor m 223
2.4.4 Erfassung der Brandlasten 224
2.4.4.1 Ungeschützte Brandlasten 224
2.4.4.2 Brandlasten, die unberücksichtigt bleiben 224
2.4.4.3 Mit Einrichtungsschutzanlagen geschützte Bereiche 224
2.4.4.4 Mit Löschanlagen gesondert geschützte Teilflächen 224
2.4.4.5 Brandlasten in Außenwänden 224
2.4.4.6 Geschützte Brandlasten in geschlossenen Systemen 225
2.5 Umrechnungsfaktor c 225
2.6 Wärmeabzugsfaktor w 226
2.6.1 Ermittlung des Wärmeabzugsfaktors w für DIN 18230-1 226
2.6.2 Wärmebilanzrechnungen anstelle der w-Faktoren der DIN 226
2.6.3 Zuluftflächen 226
2.6.4 Anrechenbare Wärmeabzugsflächen 226
2.6.5 Grundgleichungen 229
2.6.6 Globaler Nachweis 229
2.6.7 Teilabschnitte 230
2.6.8 Teilflächen mit ungleichmäßig verteilter Brandbelastung 230
2.6.9 Teilflächen mit ungleichmäßig verteiltem Wärmeabzug 230
2.6.10 Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Ebenen 232
2.6.10.1 Öffnungen < 20 % in den Decken und im Dach 232
2.6.10.2 Übereinanderliegende Öffnungen ≥ 20 % in den Decken und im Dach 232
2.6.10.3 Bemessene Bühnen 232
2.7 Sicherheitsbeiwerte und Zusatzbeiwerte 234
2.7.1 Sicherheitsbeiwert γ 234
2.7.2 Zusatzbeiwert α_L 234
2.8 Zusammenfassung 235

3 Beispiele – Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Ebenen nach DIN 18230-1 235
3.1 Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Ebenen im Geschossbau – Definitionen 235
3.2 Brandbekämpfungsabschnitt mit mehreren Ebenen – globaler Nachweis 236
3.2.1 Geometrie und Rechenwerte 236
3.2.2 Nichtbemessene Ebenen bzw. Bühnen 236
3.2.3 Bemessene Ebenen (Decke mit Öffnungen) 236
3.3 Brandbekämpfungsabschnitt mit mehreren Ebenen – Deckenöffnungen < 20 % 237
3.3.1 Geometrie und Rechenwerte 237
3.3.2 Globaler Nachweis 237
3.3.3 Ebenennachweis – Deckenöffnung < 20 % Wärmeabzug (nicht gleichmäßig verteilt) 238
3.4 BBA ohne Deckenöffnungen 238
3.4.1 Globaler Nachweis 239
3.4.2 Öffnungsflächen für den Ebenennachweis 239
3.4.3 Ebenennachweis 240
3.5 BBA mit Deckenöffnungen ≤ 2 % 240
3.5.1 Globaler Nachweis 240
3.5.2 Öffnungsflächen für den Ebenennachweis 241
3.5.3 Ebenennachweis – Wärmeabzug über die Ebenen vernachlässigt 241
3.5.4 Ebenennachweis – mit Wärmeabzug (gleichmäßig verteilt) über die Ebenen 242
3.6 Deckenöffnungen > 20 %, übereinanderliegend 243
3.6.1 Globaler Nachweis 243
3.6.2 Ebenennachweis – Wärmeabzug über die Ebenen berücksichtigt 244

4 DIN 18230-4: Ermittlung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugs durch Brandsimulation 244
4.1 Einleitung 244
4.2 Anwendungsbereich der Norm 244
4.3 Verfahren zur Berechnung der äquivalenten Normbranddauer 245
4.3.1 Berechnung von t_a-Werten für Industriebauten durch Brandsimulation 245
4.3.2 Berechnung der äquivalenten Normbranddauer im Referenzbauteil 245
4.3.2.1 Beschreibung der Vorgehensweise 245

4.3.2.2 Referenzbauteil zur Bestimmung von $t_{ä}$ 247
4.3.3 Berechnung des Wärmeabzugsfaktors w aus der Brandsimulation 248
4.4 Temperatur-Zeit-Verläufe für Brände in Industriebauten 248
4.4.1 Anforderungen an Brandsimulationsberechnungen 248
4.4.2 Brandsimulation mit Zonenmodellen – Geometriemodellierung 249
4.4.3 Brandsimulationen mit CFD-Modellen – Geometriemodellierung 249
4.4.4 Randbedingungen für die Ventilation 250
4.4.4.1 Allgemeine Anforderungen bei Zonen- und CFD-Modellen 250
4.4.4.2 Besondere Randbedingungen bei der Brandsimulation mit Zonen-Modellen 250
4.4.4.3 Randbedingungen bei der Brandsimulation mit CFD-Modellen 250
4.4.5 Bedingungen für Brandszenarien bei der Brandsimulation in Industriebauten 250
4.4.5.1 Anforderungen bei der Modellierung von Brandszenarien 250
4.4.5.2 Brandregime 252
4.4.5.3 Arten von Brandszenarien 253
4.4.5.4 Entwicklung von Brandszenarien für die Brandsimulation 254
4.4.6 Brandszenarien für den Nachweis von $t_{ä}$ auf Teilflächen, Teilabschnitten und Ebenen 254
4.4.6.1 Brandszenarien für Teilflächenbereiche in Brandbekämpfungsabschnitten 254
4.4.7 Plumeformeln für Zonenmodelle 255
4.4.8 Besonderheiten der Brandszenarien bei CFD-Modellen 256
4.5 Sicherheitskonzept und Nachweise 256
4.5.1 Allgemeines 256
4.6 Dokumentation und Prüfung von Ergebnissen aus Brandsimulationen 256
4.7 Anhänge zur DIN 18230-4 257
4.7.1 Übersicht 257
4.7.2 Beispiel für eine Brandsimulation nach Anhang A von DIN 18230-4 257
4.7.2.1 Aufgabenstellung 257
4.7.2.2 Auswertungen 257
4.7.2.3 Brandszenarium und Stoffdaten 258
4.7.3 Simulationsergebnisse mit einem Mehrraum-Zonenmodell 259
4.8 Zusammenfassung 259

5 Sicherheitskonzept der DIN 18230 261
5.1 Zielsetzung 261
5.2 Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden 261
5.2.1 Entstehungsbrände 261
5.2.2 Schadenfeuer 262
5.3 Zulässige Wahrscheinlichkeiten im Brandfall 262
5.3.1 Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit 262
5.3.2 Versagenswahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeitsindex β 263
5.3.3 Zulässige Wahrscheinlichkeiten p_f 263
5.3.4 Zulässige Wahrscheinlichkeiten $p_{f,fi}$ 264
5.4 Sicherheitsbeiwerte 265
5.4.1 Nachweise 265
5.4.2 Grundlagen 265
5.4.3 Sicherheitsbeiwerte in DIN 18230-1 265
5.4.4 Bemessungswert der Feuerwiderstandsdauer 266
5.4.5 Sicherheitsbeiwerte in DIN EN 1991-1-2/NA (Anhang B) 266
5.4.6 Sicherheitsbeiwerte in DIN 18230-4 267

6 Literatur 269

1 Einleitung

1.1 Industriebaurichtlinie

Die Muster-Industriebaurichtlinie (MIndBauRL) Fassung März 2000 ist zwischenzeitlich in nahezu allen Bundesländern als Technische Baubestimmung bauaufsichtlich eingeführt. Sie wird zurzeit überarbeitet, auch um die Neuerungen der DIN 18230-1 im Hinblick auf Ebenennachweise und Teilabschnittsnachweise zu berücksichtigen. Mit einer neuen Fassung ist 2011 zu rechnen, d. h. gültig ist derzeit die oben zitierte Fassung.

1.2 DIN 18230

Für den Brandschutz in Industriebau DIN 18230 liegen folgende Normteile vor:

Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer
Teil 2: Ermittlung des Abbrandfaktors m
Teil 3: Rechenwerte
Teil 4: Berechnung der äquivalenten Normbranddauer und des Wärmeabzugsfaktors durch Brandsimulation (Entwurf)

Teil 1 der Norm dient der Ermittlung der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer der Bauteile von Brandbekämpfungsabschnitten im Industriebau. Die Ausgabe Mai 1998 wird durch die Ausgabe September 2010 ersetzt. Im Abschnitt 2 wird auf diesen Teil im Einzelnen eingegangen.

Der Teil 2 der Norm, Ausgabe Januar 1999, ruht derzeit, d. h. neue Abbrandfaktoren können nicht direkt gemessen werden. Eine Vielzahl der notwendigen Werte für die Durchführung von Berechnungen sind zwischenzeitlich im Teil 3 genormt (s. u.). Im Einzelfall sind geeignete m-Faktoren anhand der vorliegenden Versuchserfahrung auch gutachterlich festlegbar. In konkreten Fällen kamen in der Vergangenheit auch Naturbrandversuche zur Anwendung. In der neuen DIN 18230-4 wird anstelle des m-Faktors die Verbrennungseffektivität χ der Stoffe verwendet, ein international ebenfalls angewendetes Verfahren.

Teil 3 der Norm, Ausgabe August 2002, enthält Rechenwerte für Heizwerte, Abbrandfaktoren und flächenbezogene Brandleistungen. Die Norm gibt auch an, wie Abbrandfaktoren für Lagerguthöhen von mehr als 4,5 m anzupassen sind.

Teil 4 der Norm – Berechnung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugsfaktors durch Brandsimulation – ist zurzeit in Bearbeitung. Nach der Muster-Industriebaurichtlinie können differenzierte Methoden des Brandschutzingenieurwesens auch direkt angewendet werden. Im Teil 4 wird das Berechnungsverfahren zur Bestimmung von $t_{\ddot{a}}$ auf der Basis von Wärmebilanzrechnungen genormt, sodass dieses Verfahren als allgemeine Ingenieurmethode zur Verfügung steht. Hierüber wird in Abschnitt 4 berichtet.

1.3 Weitere Regelwerke im Bereich des Industriebaus

Die Normenreihe DIN 18234 mit den Teilen 1 bis 4 regelt Anforderungen und Prüfungen bei großflächigen Dächern, wie sie auch – aber nicht nur – bei Industriebauten vorkommen. Die VDI-Richtlinie 3564, Fassung November 2009, enthält Empfehlungen für Hochregallager, die in der MindBauRL und DIN 18230 nicht behandelt werden.

2 Inhalte und Erläuterung der DIN 18230-1

2.1 Grundlagen

2.1.1 Äquivalente Branddauer

Die folgenden Ausführungen enthalten Auszüge aus [1] und von DIN 18230-1 [12]. In der Norm finden sich weitere Hinweise und Erläuterungen in ausführlicher Form.

In der Ausgabe September 2010 wird weiterhin das bewährte Verfahren der **äquivalenten Branddauer** $t_{\ddot{a}}$ zur Bestimmung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer verwendet [12]. Die äquivalente Branddauer $t_{\ddot{a}}$ entspricht der Zeit, bei der im Normbrand (DIN 4102-2) näherungsweise dieselbe Brandwirkung im Bauteil erreicht wird wie im natürlichen Schadensfeuer (s. Bild 1). Mit dem Bezug auf die Normbrandbeanspruchung nach DIN 4102 wird erreicht, dass der in vielen tausend Versuchen seit Jahrzehnten erreichte Stand des Wissens um die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen auch weiterhin genutzt werden kann. Als maßgebend für die relevanten Brandwirkungen im Bauteil wird die Temperaturerhöhung betrachtet, da bei Stahl- und Betonbauteilen die Abnahme der Festigkeit und des E-Moduls bei diesen beiden Werkstoffen mit dem erreichten Temperaturniveau verknüpft ist [3].

Die äquivalente Branddauer wird ermittelt unter Berücksichtigung der

- vorhandenen rechnerischen Brandbelastung q_R in kWh/m²,
- eines Umrechnungsfaktors „c" in min m²/kWh,
- des Wärmeabzugsfaktors w im betreffenden Bemessungsabschnitt

aus der Beziehung:

$$t_{\ddot{a}} = q_R \cdot c \cdot w \quad \text{in min} \tag{1}$$

Dabei wird vom Modell eines *vollentwickelten* Brandes ausgegangen, bei dem die gesamte Menge der brennbaren Stoffe verbrennt. In Anpassung an natürliche Brandsituationen wird das vorhandene Wärmepotenzial, d. h. die im Brandfall theoretisch maximal freisetzbare Wärmemenge, in eine bewertete (rechnerische) Brandbelastung q_R gemäß DIN 18230-1 mithilfe von Faktoren umgerechnet, welche die Materialeigenschaften und -zustände der brennbaren Stoffe berücksichtigen.

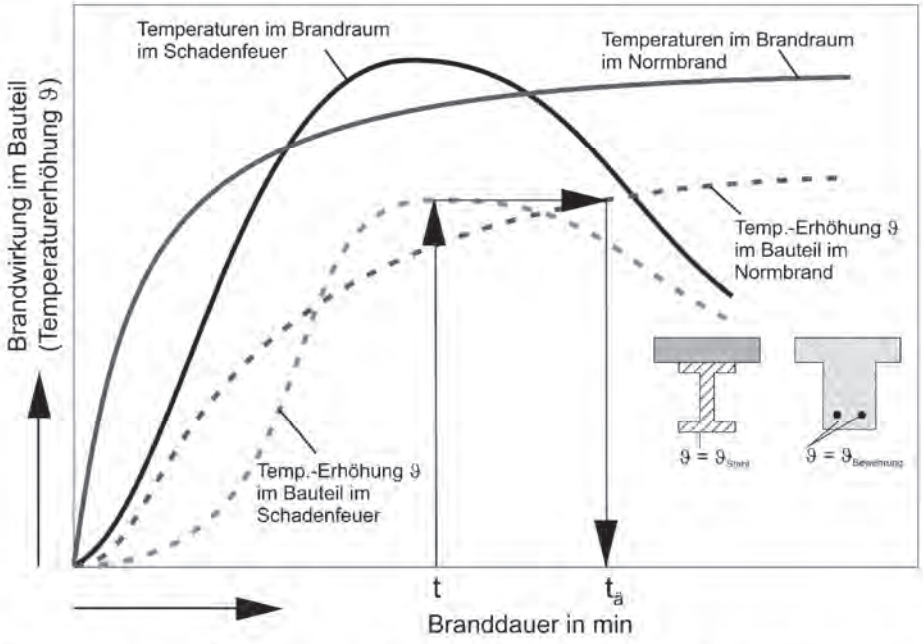


Bild 1. Umrechnung der Brandwirkung eines Naturbrandes auf die Brandwirkung nach DIN 4102-2 (nach [1] und [4])

Mit den beiden Faktoren c und w werden die Einflüsse der tatsächlichen thermodynamischen Gegebenheiten vor Ort auf die im natürlichen Schadensfeuer auftretende Brandwirkungen beim Abbrand der rechnerischen Brandbelastung q_R erfasst und die Übertragbarkeit auf die Bauteilprüfpraxis hergestellt. Mit dem Wärmeabzugsfaktor w wird berücksichtigt, in welchem Anteil im Brandfall die entstehenden Rauchgase abfließen können und inwieweit dies zu einer Temperaturentlastung der Bauteile durch Wärmeübertragung führt. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei die wirksamen Öffnungsflächen in den Wänden und im Dach sowie die maßgebende Höhe des Bemessungsabschnitts [5].

Die Möglichkeit, eine äquivalente Branddauer mit ingenieurmäßigen Berechnungsmethoden zu ermitteln, war ein wesentlicher Grund für eine Überarbeitung der Vornorm DIN V 18230, Ausgabe September 1987. Im Rahmen der Erstellung der DIN 18230-1, Ausgabe 1998, wurden umfangreiche Brandsimulationen zur Berechnung der w-Faktoren in der Norm durchgeführt. Auch die w-Faktoren für den Nachweis der äquivalenten Branddauer von Teilabschnitten wurden auf diese Weise ermittelt.

2.2 Anwendung

Die Norm gilt nur in Verbindung mit der Muster-Industriebaurichtlinie (MIndBauRL). Sie gilt für oberirdische **Industriebauten**, das sind Gebäude oder Gebäudeteile im Bereich der Industrie und des Gewerbes, die der Produktion (Herstellung, Behandlung, Verwertung, Verteilung) oder der Lagerung von Produkten oder Gütern dienen. Hierzu zählen auch zugehörige betriebsnotwendige **Nebenräume** wie z. B. Büros, Sozialräume, Laborräume, Prüfstandsbereiche, Entwicklungsflächen; sie können offen mit den primären Nutzungsbereichen (Produktion, Lagerung) in Verbindung stehen oder durch feuerwiderstandsfähige Umschließungen von diesen getrennt sein. Die Norm darf nur angewendet werden, wenn die Brandbelastung bekannt ist und/oder durch die Nutzung festgelegt wird.

Im Rahmen der MIndBauRL werden auf der Grundlage der ermittelten Brandlasten durch das Rechenverfahren nach DIN 18230-1

- die äquivalente Branddauer $t_ä$ zur Bestimmung der zulässigen Fläche und
- die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen

ermittelt.

2.2.1 Erforderliche Feuerwiderstandsdauer

Für die brandschutztechnische Bemessung von tragenden und raumabschließenden Bauteilen wird die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F auf der Grundlage der äquivalente Branddauer $t_ä$ bestimmt. Der Nachweis gilt als erbracht, wenn die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile gleich oder größer ist als die erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Für Bauteile zur Trennung von Brandbekämpfungsabschnitten und

deren tragende und aussteifenden Konstruktionen muss die erforderliche Feuerwiderstandsdauer mindestens der äquivalenten Branddauer $t_{ä}$ entsprechen. Wände zur Trennung von Brandbekämpfungsabschnitten müssen darüber hinaus gemäß der MIndBauRL weitergehende Anforderungen entsprechend DIN 4102-3 erfüllen.

Die erforderliche Feuerwiderstandsdauer wird wie folgt ermittelt:

$$\text{erf } t_F = t_{ä} \cdot \gamma \cdot \alpha_L \quad \text{in min} \qquad (2)$$

mit

γ Sicherheitsbeiwert, abhängig von der Brandabschnittsfläche, der Anzahl der Geschosse/Ebenen und der Brandsicherheitsklassen SK_b

α_L Zusatzbeiwert zur Berücksichtigung der brandschutztechnischen Infrastruktur

In den Sicherheitsbeiwerten werden die allgemein erforderlichen Brandschutzmaßnahmen zur Bekämpfung von Bränden, z. B. insbesondere eine ausreichende Löschwasserversorgung und eine öffentliche Feuerwehr nach Landesrecht, vorausgesetzt. Das Sicherheitskonzept entspricht im Wesentlichen dem in der ersten Ausgabe der Norm verwendeten Konzept (vgl. Abschnitt 5 in diesem Beitrag).

Die Zuordnung von Bauteilen zu den Brandsicherheitsklassen SK_b wie auch die im Einzelnen erforderliche Feuerwiderstandsfähigkeit sind in der MIndBauRL geregelt. Für den Bezug auf klassifizierte Bauteile gilt die folgende bauaufsichtliche Entsprechung:

0	$< \text{erf } t_F \leq$	15 min	→ keine definierte Feuerwiderstandsfähigkeit
15	$< \text{erf } t_F \leq$	30 min	→ feuerhemmend
30	$< \text{erf } t_F \leq$	60 min	→ hoch feuerhemmend
60	$< \text{erf } t_F \leq$	90 min	→ feuerbeständig

Alternativ kann die zu erf t_F gehörende obere Klassenbegrenzung auch als Einwirkungsdauer der nominellen Temperatur-Zeit-Kurve nach DIN 4102-2 als Brandeinwirkung für Berechnungsverfahren (entsprechend DIN EN 1992-1-2 bis DIN EN 1995-1-2 und weiteren Teilen entsprechend ihrer bauaufsichtlichen Einführung) verwendet werden. Die Einflüsse auf die Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstanddauer sind in Bild 2 dargestellt.

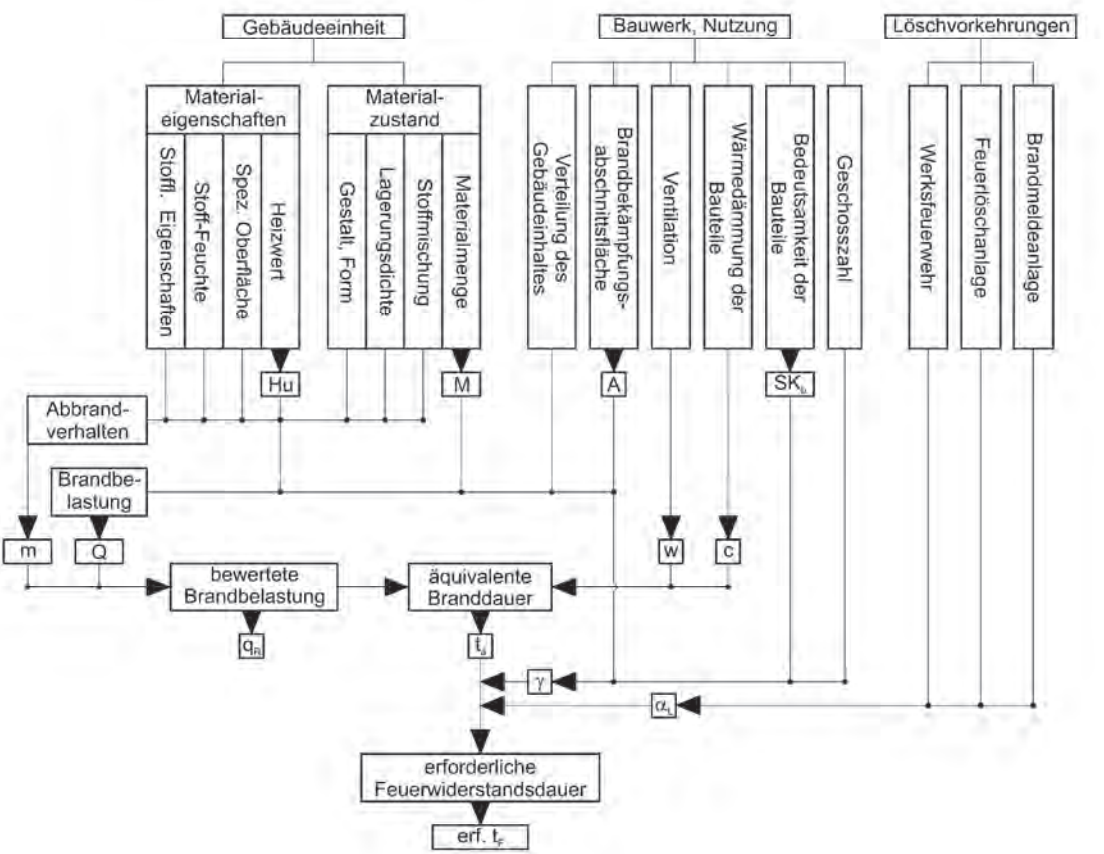


Bild 2. Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer nach DIN 18230-1

2.3 Gebäudestruktur und Nachweise

2.3.1 Geschosse und Ebenen

In DIN 18230-1, Ausgabe Sept. 2010, wird folgende Unterscheidung vorgenommen:

Geschosse
Die Decken sind auf die erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F standsicher *und raumabschließend* bemessen. Es gibt keine Öffnungen in den Decken, oder aber die Öffnungen haben Abschlüsse mit der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer erf t_F. Eine Brandausbreitung über die Geschossdecken wird nicht unterstellt – sie ist aber über die Außenwände nicht ausgeschlossen (mehrgeschossiger Brandbekämpfungsabschnitt, Bild 3).
Bei Maßnahmen an den Außenwänden (Kragplatten, Brüstungen, entsprechend der MIndBauRL) wird dann auch keine Brandausbreitung über die Außenwände unterstellt und es handelt sich um Brandbekämpfungsabschnitte, die übereinander angeordnet sind (Bild 4).

Ebenen
Decken sind auf die erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F standsicher bemessen. Öffnungen haben keine Abschlüsse/Abdeckungen oder Abschlüsse/Abdeckungen mit einer geringeren Feuerwiderstandsdauer als die erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F. Eine Brandausbreitung über die Ebenen wird je nach Größe und Ausführungen der Öffnungen in Kauf genommen („mehrebeniger" Brandbekämpfungsabschnitt, Bild 5). In der MIndBauRL wird geregelt, welche Ebenen zu bemessen sind.
Das Geschoss kann auch als Sonderfall der Ebene angesehen werden: Die Decke der Ebene ist dann auch hinsichtlich des Raumabschlusses für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer bemessen. Es gibt auch Mischformen, z. B. gemäß Bild 6.
Wenn die erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F weniger als 15 Minuten beträgt, dann gilt eine Decke auch dann als bemessen, wenn sie keine definierte Feuerwiderstandsdauer aufweist. In diesen Fällen ist ein mehrebeniger Brandbekämpfungsabschnitt gleichzeitig ein mehrgeschossiger Brandabschnitt, wenn die Öffnungen zumindest dichte, geschlossene Blechabdeckungen (Tränen-/Riffelbleche) haben.

2.3.2 Fläche A_B des Brandbekämpfungsabschnittes

Die Fläche A_B ist maßgebend für die Höhe der Brandbelastung – je mehr Flächen angerechnet werden, umso kleiner die Brandbelastung. Andererseits nimmt der Sicherheitsbeiwert γ mit der Fläche des Brandbekämpfungsabschnitts zu. Schließlich wird die zulässige Fläche des Brandbekämpfungsabschnitts in der MIndBauRL wiederum abhängig von der Brandbelastung (bzw. $t_ä$) begrenzt. A_B wird wie folgt ermittelt:

$$A_B = A_G + \sum_{i=1}^{n} A_{B,i} \qquad (3)$$

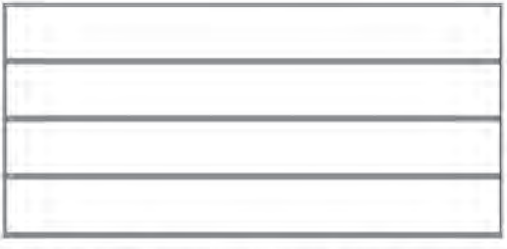


Bild 3. Mehrgeschossiger Brandbekämpfungsabschnitt (Schnitt)

Bild 5. Mehrebeniger Brandbekämpfungsabschnitt (Schnitt)

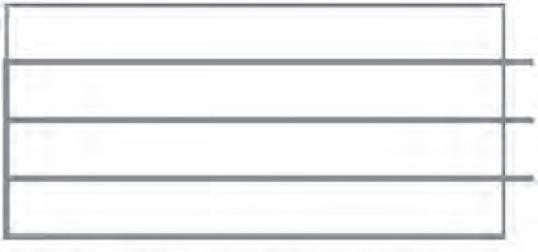


Bild 4. Übereinander angeordnete Brandbekämpfungsabschnitte (Schnitt)

Bild 6. Zweigeschossiger Brandbekämpfungsabschnitt, davon ein Geschoss mit mehreren Ebenen, welche bemessen sind, aber Öffnungen haben (Schnitt)

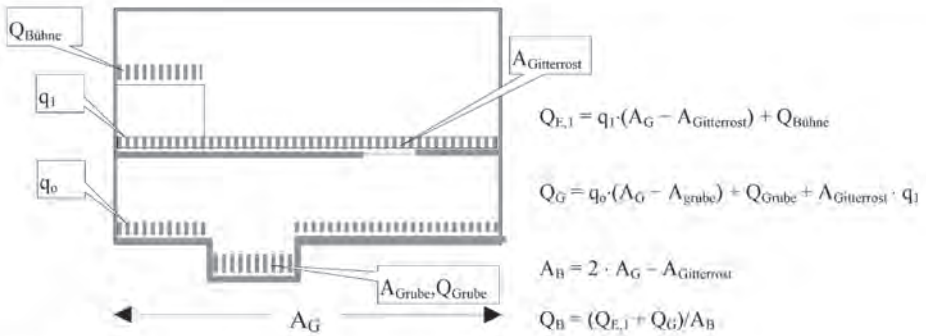


Bild 7. Beispiel für die Fläche eines Brandbekämpfungsabschnitts A_B mit 2 Ebenen (Schnitt)

Dabei sind

A_G Grundfläche des Brandbekämpfungsabschnittes, gemessen zwischen den aufgehenden Umfassungsbauteilen

$A_{E,i}$ Bodenfläche der Ebene oder Geschosses i

n Gesamtzahl der höher gelegenen Ebenen oder Geschosse des Brandbekämpfungsabschnittes

Flächen unter Vordächern sind auf die Fläche A_G anzurechnen, wenn sie der Bereitstellung von Waren dienen und die Außenwände gegenüber diesen Flächen nicht für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer bemessen sind. Bodenflächen $A_{E,i}$ sind mit ihrer Fläche der Brandbekämpfungsabschnittsfläche zuzurechnen, sofern diese nach den Regelungen der MIndBauRL hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer zu bemessen sind. Flächen von Gruben sind der darüber liegenden anrechenbaren Fläche zuzurechnen.

Nicht angerechnet werden Flächen von Öffnungen ohne Abdeckungen oder mit Gitterrostabdeckungen, Flächen von Öffnungen mit Abdeckungen oder Durchführungen und Flächen von Einbauten, die hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit nicht für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer bemessen sind. Die Brandlast auf diesen Flächen ist der nächsten darunter liegenden anrechenbaren Fläche zuzuschlagen (s. Bild 7).

Sicherheitsbeiwerte γ für die Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer nach Gl. (2) sind immer für die Fläche A_B des Brandbekämpfungsabschnitts zu ermitteln, außer bei Teilabschnitten, die den Bedingungen von Anhang A der Norm entsprechen.

2.3.3 Globaler Nachweis

Beim sogenannten globalen Nachweis wird eine mittlere äquivalente Branddauer für den gesamten Brandbekämpfungsabschnitt bestimmt; die Brandlasten werden auf die Fläche A_B des Brandbekämpfungsabschnitts bezogen und es wird von gemittelten Ventilationsbedingungen im Brandbekämpfungsabschnitt ausgegangen.

In bestimmten Fällen darf der globale Nachweis durch Teilabschnitts- oder Ebenennachweise ersetzt werden. Für die Bauteilbemessung müssen fallweise weitere Nachweise (Teilflächennachweise, Ebenennachweise) geführt werden.

Anmerkung: Beim globalen Nachweis und den weiteren Nachweisen handelt es sich um unterschiedliche Bereiche, die für die Bestimmung der äquivalenten Branddauer betrachtet werden – und somit eigentlich nicht um „Nachweise". Die jeweils betrachteten Bereiche werden im Abschnitt 8 der Norm auch als „Bemessungsabschnitte" bezeichnet.

2.3.4 Teilabschnittsnachweise

In erdgeschossigen Gebäuden können – anstelle des globalen Nachweises – äquivalente Branddauern für Teilabschnitte bestimmt werden, wenn der Brandbekämpfungsabschnitt

- keine weiteren Ebenen hat,
- zumindest an einer Außenwand von der Feuerwehr angefahren werden kann

und die Teilabschnitte so voneinander abgetrennt sind, dass eine Ausbreitung von Feuer über die Abtrennung hinweg nicht zu erwarten ist – für die einzuhaltenden Bedingungen siehe Anhang A der Norm.

Die äquivalente Branddauer wird separat je Teilabschnitt ermittelt ($t_{\ddot{a},A}$), indem die Brandlasten jeweils auf die **Teilabschnittsfläche A_A** (ohne Freistreifen) bezogen und die Ventilationsbedingungen für den Teilabschnitt angesetzt werden (vgl. Abschn. 2.6.7). Der gewichtete Mittelwert der äquivalenten Branddauern der Teilabschnitte darf anstelle von $t_{\ddot{a}}$ aus dem globalen Nachweis verwendet werden. Wegen der günstigeren Wärmeabzugsverhältnisse für Teilabschnitte erhält man eine kleinere äquivalente Branddauer als beim globalen Nachweis.

Die erforderliche Feuerwiderstandsdauer wird je Teilabschnitt bestimmt, wobei der Sicherheitsbeiwert γ dann für die Fläche A_A ermittelt werden darf. Bei der Bauteilbemessung ist allerdings zu berücksichtigen, ob Teilabschnitte mit unterschiedlicher erforderlicher Feuerwiderstandsdauer statisch voneinander unabhängig sind. Andernfalls ist der ungünstigste Teilabschnitt maßgebend für die Bemessung.

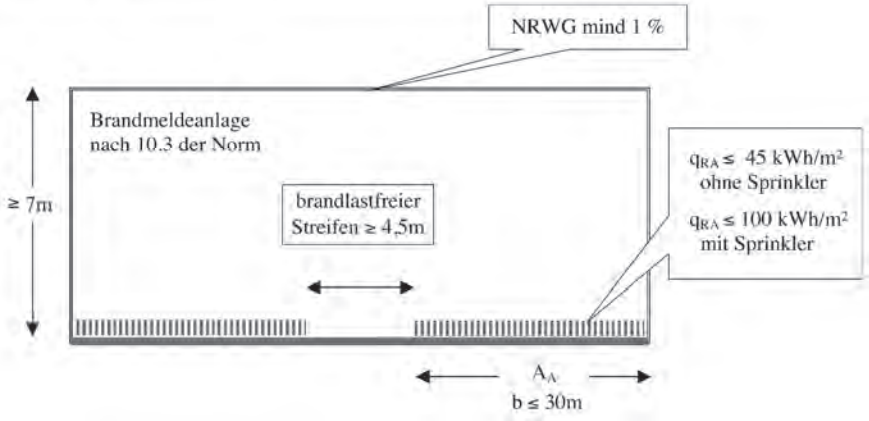


Bild 8. Beispiel für Teilabschnitt nach Anhang A.2.1 der Norm (Schnitt)

2.3.5 Teilflächennachweise bei ungleichmäßig verteilter Brandbelastung

Bei ungleichmäßig verteilter Brandbelastung ist für die Bauteilbemessung ein Teilflächennachweis zu führen. Eine Brandbelastung ist ungleichmäßig verteilt, wenn für die Brandbelastung $q_{R,T}$ in einer Teilfläche A_T in Relation zur mittleren Brandbelastung q_R im Brandbekämpfungsabschnitt oder Teilabschnitt gilt:

$$q_{R,T} > 1{,}6 \cdot q_R \qquad (4)$$

Die Brandbelastung in Teilflächen ist abhängig von der Größe der betrachteten Fläche, sodass es normalerweise erforderlich ist, verschiedene Lagen und Flächen abzuprüfen. Im Mittel nimmt die Brandbelastung mit wachsender Größe der Teilfläche zu (für $A_T \rightarrow A_B$ wird $q_{R,T} \rightarrow q_R$). Die zu betrachtenden **Teilflächen A_T** sollen daher nicht mehr als 5 % der Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes oder 400 m² betragen. Teilflächen von weniger als 5 % der Fläche A_B oder weniger als 400 m² sind mit ihrer ausgewiesenen Größe anzusetzen, wobei Brandlasten auf Teilflächen von weniger als 100 m² auf einer Fläche von 100 m² verteilt werden dürfen. Teilflächen A_T dürfen Freiflächen enthalten. Die MIndBauRL enthält weitere Vorgaben für Teilflächennachweise im Bereich von Bauteilen, die Brandbekämpfungsabschnitte trennen.
Bei der Ermittlung der äquivalenten Branddauer für Teilflächen können fallweise günstigere Wärmeabzugsverhältnisse als beim globalen Nachweis angesetzt werden. Errechnet sich $t_{ä,T} < t_ä$, ist jedoch $t_{ä,T} = t_ä$ zu setzen. Ein Sonderfall der Teilflächenbetrachtung ist bei Bewertung von Brandlasten in geschlossenen Systemen nach Anhang D.5 der Norm angegeben.

2.3.6 Teilflächennachweise bei ungleichmäßig verteiltem Wärmeabzug

Bei ungleichmäßig verteiltem horizontalem Wärmeabzug ist für die Bauteilbemessung ebenfalls ein Teilflächennachweis zu führen. Der Wärmeabzug gilt als ungleichmäßig verteilt, wenn die bezogene horizontale Öffnungsfläche auf einer **Teilfläche $A_T \geq 0{,}25\ A_B$** um mehr als 50 % vom mittleren Wert a_h im Brandbekämpfungsabschnitt abweicht. Wird ein Teilflächennachweis für ungleichmäßigen Wärmeabzug geführt, dann sind auch die vorhandenen Brandlasten in der angesetzten Teilfläche zu berücksichtigen. Errechnet sich $t_{ä,T} < t_ä$, ist wiederum $t_{ä,T} = t_ä$ zu setzen.

2.3.7 Ebenennachweise

Bei Brandbekämpfungsabschnitten mit mehreren Ebenen/Geschossen ist zusätzlich zur äquivalenten Branddauer $t_ä$ aus dem globalen Nachweis auch die äquiva-

Tabelle 1. Für die Bauteilbemessung maßgebende äquivalente Branddauern gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm

$t_{ä,El} < t_ä$	$t_{ä,El} < t_ä$ darf nur angewendet werden, wenn es sich um die oberste Ebene des Gebäudes handelt und wenn aufgrund der Öffnungen zur darunter liegenden Ebene keine Erhöhung erforderlich ist, s. u.
$t_{ä,El} > t_ä$	$t_{ä,El}$ muss auch für die darüber liegende Ebene angewendet werden, – bei einzelnen Deckenöffnungen > 20 m² oder – wenn die Summe der Deckenöffnungen ≥ 20 % der Deckenfläche beträgt.
	$t_{ä,El}$ muss nur für die betreffende Ebene angesetzt werden, – wenn die Summe der Deckenöffnungen ≤ 2 % der Deckenfläche beträgt.
	Bei Deckenöffnungen > 2 % und < 20 % ist $t_{ä,El}$ für die darüber liegende Ebene aus Interpolation zu ermitteln, oder bei Anwendung von Gl. (B.1) entsprechend Anhang B.2 zu berechnen.

Die Ebenennachweise ergeben für zwei unterschiedliche Einrichtungen die in den grau hinterlegten Spalten angeführten Werte für $t_{ä,Ei}$. Die äquivalente Branddauer aus dem globalen Nachweis betrage $t_ä = 35$ min. Die für die Bemessung maßgebenden äquivalenten Branddauern werden jeweils für Öffnungsflächen ≤ 2 %, ≥ 20 % und 11 % ermittelt.

Ebene	$t_{ä,Ei}$ (min)	maßgebend $t_{ä,Ei}$ (min)			$t_{ä,Ei}$ (min)	maßgebend $t_{ä,Ei}$ (min)		
		$a_{hi} \leq 0{,}02$	$a_{hi} \geq 0{,}2$	$a_{hi} = 0{,}11$		$a_{hi} \leq 0{,}02$	$a_{hi} \geq 0{,}2$	$a_{hi} = 0{,}11$
4	20	20	40	30	50	50	50	50
3	40	40	40	40	20	35	40	37,5
2	20	35	50	42,5	40	40	40	40
1	50	50	50	50	20	35	35	35

Bild 9. Beispiel für die Anwendung von Abschnitt 4.1.4 der Norm

lente Branddauer $t_{ä,Ei}$ für jede Ebene zu bestimmen. Dabei wird die Brandbelastung und der Wärmeabzug je Ebene ermittelt. Vereinfachend kann der Wärmeabzug zwischen den Ebenen vernachlässigt werden; alternativ darf er nach Anhang B der Norm berücksichtigt werden (s. Abschn. 2.6.10 dieses Beitrags). Die für die Bauteilbemessung maßgebende äquivalente Branddauer je Ebene ergibt sich nach Tabelle 1.
Entsprechend Abschnitt 4.1.2 der Norm darf das flächenmäßig gewichtete Mittel der äquivalenten Branddauern $t_{ä,Ei}$ anstelle der äquivalenten Branddauer aus dem globalen Nachweis angesetzt werden, wenn die Brandbelastung je Ebene nicht mehr als 60 kWh/m² und in ungünstigen Teilflächen nicht mehr als 100 kWh/m² beträgt.

2.4 Rechnerische Brandbelastung

2.4.1 Brandlasten

Im Sinne von DIN 18230-1 ist unter dem Begriff „Brandlast" das gesamte Wärmepotenzial der in dem betrachteten Bereich befindlichen Betriebs- und Lagerstoffe, die der Nutzung zuzurechnen sind, sowie der brennbaren Bestandteile des Gebäudes zu verstehen. Die Brandlast eines Stoffes ist im physikalischen Sinn sein Wärmepotenzial, das aus seiner Masse M (kg) und seinem Heizwert H_u (kWh/kg) berechnet wird:

$$Q = M \cdot H_u \quad \text{in kWh} \tag{5}$$

Die Masse des Stoffes wird durch Wägung in dem Zustand, in dem er in dem Abschnitt vorkommt bestimmt. Der Heizwert wird aus dem „Brennwert" H_o ermittelt, von dem die auf Normaltemperatur bezogene Verdampfungsenthalpie r des in den Verbrennungsprodukten enthaltenen Wassers μ_{H_2O} subtrahiert wird:

$$H_u = H_o - \mu_{H_2O} \cdot r \tag{6}$$

2.4.2 Brandbelastung q

Unter der Brandbelastung versteht man das auf eine Fläche A bezogene Wärmepotenzial aller dort vorhandenen Brandlasten bzw. brennbaren Stoffe:

$$q = \sum Q_i / A = \sum M_i \cdot H_{ui} / A \quad \text{in kWh/m}^2 \tag{7}$$

2.4.3 Rechnerische Brandbelastung q_R und Abbrandfaktor m

Die rechnerische Brandlast Q_R ist der Rechenwert für die im Brandfall freigesetzte Wärmemenge. Das Maß der Abweichung von dem Potenzialwert wird durch den dimensionslosen Abbrandfaktor „m" berücksichtigt. In der jüngeren Fachliteratur wird anstelle des m-Faktors die Verbrennungseffektivität χ verwendet. Dies ist z. B. auch in der DIN 18230-4 der Fall. Werte für m-Faktoren sind in DIN 18230-3 enthalten. Es ist stets $m \geq 0{,}2$ anzusetzen. Sofern Normwerte nicht vorliegen, ist mindestens m = 1 anzunehmen (für Lagerguthöhe bis 4,5 m).
Aus der Summe der rechnerischen Brandlasten Q_{Ri} mit den jeweiligen Faktoren m_i erhält man die rechnerische Brandbelastung q_R für eine Bezugsfläche A (m²) gemäß den folgenden Gleichungen. Dabei ist die Bezugsfläche A entweder die Fläche A_B des Brandbekämpfungsabschnittes oder die Fläche, die bei Nachweisen nach den Abschnitt 2.3.4 bis 2.3.7 betrachtet wird

$$Q_{Ri} = M_i \cdot H_{ui} \cdot m_i \quad \text{in kWh} \tag{8}$$

$$q_R = [\Sigma(M_i \cdot H_{ui} \cdot m_i)] / A \quad \text{in kWh/m}^2 \tag{9}$$

In der Norm wird unterschieden zwischen
- ungeschützten Brandlasten und
- geschützten Brandlasten (denen ein Kombinationswert Ψ zugeordnet wird).

Insofern sind die Brandbelastungen getrennt für die ungeschützten und geschützten Brandlasten zu ermitteln:

$$q_{R,u} = [\Sigma(M_i \cdot H_{ui} \cdot m_i)] / A \tag{10}$$
für ungeschützte Brandlasten

$$q_{R,g} = [\Sigma(M_i \cdot H_{ui} \cdot m_i \cdot \Psi)] / A \quad (11)$$

für geschützte Brandlasten

Die rechnerische Brandbelastung ergibt sich zu:

$$q_R = q_{R,u} + q_{R,g} \quad (12)$$

Für $q_{R,u}$ ist stets ein Mindestwert von 15 kWh/m² einzusetzen, auch wenn im Zuge der Brandlasterhebung geringere Brandbelastungen festgestellt wurden. Die Brandbelastung in der Berechnung ist so anzusetzen, dass das 90%-Fraktil des langjährigen Mittelwertes nicht unterschritten wird.

2.4.4 Erfassung der Brandlasten

2.4.4.1 Ungeschützte Brandlasten

Es sind alle brennbaren Einrichtungen, Betriebs- und Lagerstoffe, Verpackungen sowie alle brennbaren Baustoffe von Bauteilen einschließlich Bekleidungen (Baustoffklasse B nach DIN 4102-1) zu berücksichtigen, sofern nachfolgend nicht anderes geregelt. So sind auch Brandlasten in Nebenräumen ohne feuerwiderstandsfähige Umschließung anzurechnen.

2.4.4.2 Brandlasten, die unberücksichtigt bleiben

Bei den Brandlasten, die unberücksichtigt bleiben dürfen, handelt es sich um Stoffe und Baustoffe, die sich nicht am Brandgeschehen beteiligen können oder deren Wärmepotenzial erfahrungsgemäß nicht nennenswert an der Temperaturentwicklung im Gebäude mitwirkt. Sie sind in DIN 18230-1, Abschnitt 6.4.2, detailliert aufgeführt.

2.4.4.3 Mit Einrichtungsschutzanlagen geschützte Bereiche

Neu geregelt in DIN 18230-1, Abschnitt 6.4.6, sind Brandlasten in Anlagen und Einrichtungen, die mit einer selbsttätigen Feuerlöschanlage als Einrichtungsschutzanlage ausgestattet sind. Brandlasten in diesen Bereichen müssen nur mit der Mindestbrandbelastung 15 kWh/m² bei der Ermittlung der Brandbelastung angesetzt werden. Die so geschützten Bereiche dürfen zur Brandentwicklung und zur Ausbreitung von Feuer im Brandbekämpfungsabschnitt nicht beitragen. Daher ist eine wirksame Abtrennung zwischen geschützten und ungeschützten Bereichen entsprechend A.2 der Norm vorzusehen.
Diese Erleichterung darf nur für Einrichtungen auf einer Fläche bis maximal 400 m² in Anspruch genommen werden; bei Brandbekämpfungsabschnitten über 4000 m² darf die Summe dieser Flächen nicht mehr als 10% der Brandbekämpfungsabschnittsfläche betragen.

2.4.4.4 Mit Löschanlagen gesondert geschützte Teilflächen

Ebenfalls neu geregelt in DIN 18230-1, Abschnitt 6.4.7, sind Teilflächen mit erhöhten Brandlasten, z. B. Behälter, Block- oder Regallager, die mit einer selbsttätigen oder einer halbstationären Feuerlöschanlage ausgestattet sind. Brandlasten in diesen Teilflächen müssen nur mit der Mindestbrandbelastung 15 kWh/m² bei der Ermittlung der Brandbelastung angesetzt werden. Die so geschützten Teilflächen dürfen zur Brandentwicklung und zur Ausbreitung von Feuer im Brandbekämpfungsabschnitt nicht beitragen. Ferner sind Vorkehrungen erforderlich, damit Brände von ungeschützten Bereichen nicht auf diese geschützten Teilflächen übergreifen. Daher ist eine wirksame Abtrennung zwischen geschützten und ungeschützten Bereichen entsprechend A.2 der Norm vorzusehen. Außerdem muss die Gesamtwirkfläche der Feuerlöschanlage mindestens doppelt so groß wie die zu schützende Teilfläche sein und diese Teilfläche einschließlich der notwendigen Freistreifen allseitig gleichmäßig einschließen.
Die hier genannten Feuerlöschanlagen dürfen *nicht* bei der Ermittlung des Zusatzbeiwertes α_t angerechnet werden. Diese Erleichterung darf nur für Teilflächen bis maximal 400 m² in Anspruch genommen werden; bei Brandbekämpfungsabschnitten über 4000 m² darf die Summe dieser Teilflächen nicht mehr als 10% der Brandbekämpfungsabschnittsfläche betragen.

2.4.4.5 Brandlasten in Außenwänden

Bei Außenwänden, die etwa aus Gründen des Wärmeabzugs aus ausschmelzenden Kunststoffen, z. B. aus Polycarbonat oder Polyester hergestellt sind, ist anzunehmen, dass sie zu einer Temperaturentwicklung im Gebäudeinneren im Brandfall zumindest teilweise beitragen. Ihre Brandlast muss deshalb mit mindestens 50% angesetzt werden.
Brennbare Dämmstoffe in ein- oder mehrschichtigen Metallbauteilen, wie gedämmte Stahltrapezbleche, die unter Brandeinwirkung ihre Wärmedämmfähigkeit verlieren[1)] sind in der Regel voll anzurechnen. Bei einer Dämmung mit Kunststoffschäumen nach DIN 18164-1 ist zwischen Dämmschichten mit thermoplastischem Verhalten, wie PS-Hartschaum, und mit nichtthermoplastischem Verhalten, wie PUR- oder PF-Hartschaum, zu unterscheiden:

- Thermoplastische Dämmschichten sintern oberhalb 110 °C und schmelzen bei weiterer Erwärmung zwischen 130 °C bis ca. 180 °C; sie verlieren deshalb bereits nach sehr kurzer Dauer der Brandeinwirkung ihre wärmedämmende Wirkung. Die Schmelze trägt zum Brandgeschehen in vollem Umfang bei.
- Bei nichtthermoplastischem Hartschaum bildet sich an der vom Brand beanspruchten Seite zunächst eine oberflächige Verkohlungsschicht, die die weitere Zersetzung des Hartschaums verzögert. Der Wärmeabfluss durch das Bauteil wird dementsprechend erst mit zunehmender Brandeinwirkung wirksam, der Beitrag zur Energiefreisetzung tritt verzögert ein.

1) Siehe DIN 18230-1, Abschnitt 7, Tabelle 1.

2.4.4.6 Geschützte Brandlasten in geschlossenen Systemen

Brennbare Flüssigkeiten in Behältern mit $V \leq 450$ l ohne Druckentlastung und Brandlasten in brennbaren oder zerbrechlichen Behältern oder entsprechenden Rohrleitungen sind wie ungeschützte Brandlasten zu behandeln.

Nach der Normdefinition gelten brennbare Stoffe in geschlossenen Behältern aus Stahlblech oder anderen nicht zerbrechlichen und im Brandverhalten vergleichbaren Werkstoffen mit $V > 450$ l als „geschützt". Dies gilt auch für Brandlasten in Rohrleitungen aus vergleichbaren Werkstoffen. Sofern sich in den Behältern Mannlöcher, Abfüll- oder Befülleinrichtungen befinden, gelten sie für das Berechnungsverfahren für den Normalbetrieb als geschlossen.

Die Behandlung von Brandlasten in geschlossenen Systemen bleibt gegenüber der früheren Ausgabe von DIN 18230-1 unverändert. Mit Kombinationsbeiwerten ψ_i wird die Schutzwirkung der Systeme und das Zusammenwirken ungeschützter und geschützter Brandlasten berücksichtigt. Im Haupttext der Norm gibt es ein einfaches Verfahren, das sich an die Regelungen der TRbF zur Bemessung von Auffangräumen anlehnt. Vereinfachend kann immer angesetzt werden:

für den Behälter/das System mit der größten Brandlast: $\psi_1 = 0{,}8$
für alle weiteren Behälter/Systeme: $\psi_i = 0{,}55$

Für Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt > 100 °C (z. B. Hydraulik-, Schneid- oder Schmieröl) in Maschinen, die im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht über ihrem Flammpunkt betrieben werden und für eine zusätzliche ungeschützte rechnerische Brandbelastung $q_{R,u} \leq 45$ kWh/m² gilt:

für den Behälter/das System mit der größten Brandlast: $\psi_1 = 0{,}8$
für alle weiteren Behälter/Systeme: $\psi_i = 0$

Die Brandbelastung $q_{R,g}$ aus den so bewerteten geschützten Brandlasten darf als gleichmäßig verteilt im Brandbekämpfungsabschnitt angenommen werden (kein Teilflächennachweis aufgrund geschützten Brandlasten erforderlich). Daneben gibt es ein Verfahren, bei dem die Schutzwirkung von Behältern unter der Brandbeanspruchung aus der ungeschützten Brandbelastung genauer erfasst wird. Das Verfahren ist im Anhang D der Norm enthalten. Beide Verfahren gelten für brennbaren Flüssigkeiten und für brennbare pastöse Stoffe und Feststoffe in geschlossenen Systemen. Nicht behandelt wird eine mögliche Explosionswirkung staubförmiger Stoffe und brennbarer Gase oder Dämpfe.

2.5 Umrechnungsfaktor c

Mit dem Umrechnungsfaktor c wird der Einfluss der Umfassungsbauteile (Wände, Verglasungen, Decken, Dach) auf die Temperaturentwicklung im Brandfall erfasst. Dabei geht insbesondere die Wärmedämmung bzw. die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe in die Betrachtung ein. Die Einstufung von Bauteilen in Einflussgruppen zur Festlegung des Umrechnungsfaktors c ist in Tabelle 2 in Verbindung mit den zugeordneten Wärmeeindringzahlen angegeben.

Tabelle 2. Umrechnungsfaktor c nach DIN 18230-1

c min m²/kWh	Einflussgruppe der Umfassungsbauteile[1)]	Wärmeeindringzahl b $W \cdot h^{1/2}/(m^2 \cdot K)$
0,15	I	> 42
0,20	II	12 bis 42
0,25	III	< 12

1) Die Umfassungsbauteile werden entsprechend dem Wärmeabfluss im Brandfall wie folgt eingestuft:

Einflussgruppe I:
Bauteile bzw. Baustoffe mit großem Wärmeabfluss wie: Verglasungen, Aluminium, Glas, Stahl.

Einflussgruppe II:
Bauteile bzw. Baustoffe mit mittlerem Wärmeabfluss wie: Beton, Leichtbeton mit einer Rohdichte > 1000 kg/m³, Kalksandstein, Bauteile mit Putz, Mauerziegel.

Einflussgruppe III:
Bauteile bzw. Baustoffe mit geringem Wärmeabfluss wie: Baustoffe mit einer Rohdichte ≤ 1000 kg/m³, wie z. B. Faserdämmstoffe, Porenbeton, Holz, Holzwolle-Leichtbauplatten, Leichtbeton, Dämmputz, mehrschichtige Bauteile

In Einflussgruppe I werden Bauteile bzw. Baustoffe mit großem Wärmeabfluss und freie Öffnungen, in Einflussgruppe II Bauteile bzw. Baustoffe mit mittlerem Wärmeabfluss und in Einflussgruppe III Bauteile bzw. Baustoffe mit geringem Wärmeabfluss eingeordnet. Bei beheizten oder klimatisierten Neubauten ist – aufgrund der Energieeinsparverordnung – allerdings zunehmend von der Einflussgruppe III auszugehen.

Der Umrechnungsfaktor c darf als über die Flächen der Umfassungsbauteile (Decke und Wände) gewichtetes Mittel berechnet werden (s. Anhang E 12 der Norm).

Der Umrechnungsfaktor c darf zu 0,15 angenommen werden, wenn die dämmende Wirkung im Brandfall verlorengeht. Dies ist allerdings nachzuweisen, wobei solche Nachweisverfahren derzeit noch nicht vorliegen. Daher müssen die Wärmedämmstoffe mit ihrem zugehörigen Umrechnungsfaktor c oder Wärmeeindringzahl b unter Raumtemperaturen berücksichtigt werden. Bei Nachweisen für Teilabschnitte und Teilflächen darf näherungsweise für die offenen Seiten der Teilfläche der Umrechnungsfaktor $c = 0{,}15$ gesetzt werden. Dieses ist eine sehr ungünstige Annahme, d. h. in so einem Fall wird eine Brandsimulation nach DIN 18230-4 deutlich günstigere Werte für $t_{\ddot{a}}$ ergeben.

2.6 Wärmeabzugsfaktor w

2.6.1 Ermittlung des Wärmeabzugsfaktors w für DIN 18230-1

Im Brandfall wird ein Teil der entstehenden Wärme aus dem Brandbekämpfungsabschnitt über offene oder öffenbare Flächen abgeführt. Der Wärmeabzugsfaktur w bewertet die damit einhergehende Temperaturentlastung der Bauteile. Die Diagramme zur Ermittlung des Wärmeabzugsfaktors w wurden unter Auswertung von Wärmebilanzrechnungen für **eingeschossige** Brandbekämpfungsabschnitte ohne Zwischenbühnen nach [5] unter Verwendung des Rechenprogramms MRFC (Multi Room Fire Code) gewonnen. Als Wärmesenken wurden dabei nur die Umfassungsbauteile (keine Zwischenwände, Decken oder Einbauten) berücksichtigt.

Die durchgeführten Berechnungen gehen davon aus, dass eine Bemessungsbrandlast von 144 kWh/m² gleichmäßig über den gesamten Brandbekämpfungsabschnitt von 2400 m² und 7 m Höhe verteilt ist. Ausgehend von einem Brandherd in der Mitte des Brandbekämpfungsabschnittes breitet sich der Brand in der Phase der Brandentwicklung mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 m/min nach vier Seiten aus, bis die Hallenwände erreicht werden. Auf der so entstandenen Brandfläche verbrennt das Brandgut unter Berücksichtigung des m-Faktors (Mischbrandlast aus Holz und verschiedenen Kunststoffen) mit einem modifizierten Heizwert von 3,74 kWh/kg bei einer definierten Abbrandgeschwindigkeit von 20 kg/m²h, bis die gesamte Brandlast verbraucht ist. Für die Bemessungskonfiguration tritt dabei nach etwa 30 min eine Vollbrandsituation ein, bei der das Brandgut über die gesamte Grundfläche des Bemessungs-Brandbekämpfungsabschnittes brennt. Bei anderen Verhältnissen von Brandbelastung zu Hallengröße ist dies nicht immer der Fall.

Bezüglich der Lage der vertikalen Öffnungsflächen wurde in den Berechnungen angenommen, dass ein Teil davon in Form von Toren (ca. alle 20 bis 30 m) direkt über dem Fußboden und der Rest in der oberen Hälfte der Wände mit einem Abstand von 1 m vom Dach gleichmäßig verteilt angeordnet sind. Für die Öffnungen im oberen Wandbereich wurde praxisgerecht angenommen, dass diese erst nach Erreichen von Rauchgastemperaturen im Brandbekämpfungsabschnitt zwischen 80 und 100 °C geöffnet werden. Das Brandszenarium ist in [6] und [7] ausführlich beschrieben.

Aus den äquivalenten Branddauern der Simulationsrechnungen wurden unter Berücksichtigung der rechnerischen Brandbelastung und des Umrechnungsfaktors c dann w-Faktoren berechnet. Diese sind mittels Approximation der Ergebnisse durch die Gl. (12) bis (14) in DIN 18230-1 angenähert worden, wobei die Gleichungen im Allgemeinen auf der sicheren Seite liegende Werte ergeben.

2.6.2 Wärmebilanzrechnungen anstelle der w-Faktoren der DIN

Alternativ zur Ermittlung des Wärmeabzugsfaktors w nach 8.3 der Norm kann dieser auch als genauerer Nachweis anhand von Wärmebilanzrechnungen – künftig nach DIN 18230-4 – geführt werden (s. Abschn. 4). Günstigere Wärmeabzugsfaktoren kann man insbesondere in folgenden Fällen erhalten:

- sehr hohe Brandbekämpfungsabschnitte mit Rauch- und Wärmeabzugsanlagen,
- Brandbekämpfungsabschnitte mit $A_v > 0{,}03$ und zusätzlichen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen,
- Brandbekämpfungsabschnitte mit Bränden auf Teilabschnitten bei kleinen Verhältniswerten A_T/A_B,
- bei gutem Rauch- und Wärmeabzug auf Teilflächen.

Wärmebilanzrechnungen liefern nicht in jedem Fall günstigere Ergebnisse als das Näherungsverfahren der Norm. Dies gilt insbesondere für Brandbekämpfungsabschnitte mit Flächen über 5000 m² bei geringer und ausschließlicher Ventilation an den Wänden.

2.6.3 Zuluftflächen

Bei Berechnung des Wärmeabzugsfaktors nach DIN 18230-1, Abschnitt 8.3, müssen zur Sicherstellung der Abströmung über Öffnungsflächen entsprechende Öffnungen auch in der unteren Hälfte, mindestens jedoch in der unteren Ebene, des betrachteten Brandbekämpfungsabschnittes oder der betrachteten Ebene vorhanden sein. Diese Öffnungen müssen mindestens 6 m² groß und

- offen sein, oder
- durch die Feuerwehr leicht von außen zu öffnen sein, oder
- im Brandfall automatisch angesteuert werden.

Diese Öffnungsflächen dürfen bei der Fläche A_v nach Gl. (13) angerechnet werden. Können diese Flächen nicht angeordnet werden, ist der maximale Faktor ($w_0 = 2{,}4$) anzusetzen.

2.6.4 Anrechenbare Wärmeabzugsflächen

Als Wärmeabzugsfläche gilt jeweils die (anrechenbare) lichte freiwerdende Öffnung bzw. die geometrisch freie Fläche der Öffnung; in anderen Fällen vereinfacht auch 85 % der Fläche, die sich aus den Rohbaumaßen ergibt. Es gibt Öffnungsflächen, die immer angerechnet und Flächen, die nach Abschnitt 8.2 der Norm nur in Abhängigkeit von der äquivalenter Branddauer angerechnet werden können (s. Tabelle 3).

Die unterschiedliche Anrechenbarkeit von Öffnungen nach den Zeilen 4 bis 7 in Tabelle 3 führt dazu, dass für äquivalente Branddauern von $t_{\ddot{a}} \leq 15$ min und $15 < t_{\ddot{a}} \leq 30$ min sowie für $t_{\ddot{a}} > 30$ min jeweils eigene w-Faktoren ermittelt werden müssen – außer dass der in Bezug auf die Anrechenbarkeit ungünstigste Fall $t_{\ddot{a}} < 15$ min unterstellt wird.

Tabelle 3. Anrechenbarkeit von Öffnungen beim w-Faktor

	Art des Öffnungsverschlusses	Anrechenbarkeit
1	ständig offen	immer
2	von außen ohne Gewaltanwendung zu öffnen	immer
3	Flächen von Rauch- und Wärmeabzugsgeräten nach DIN EN 12101-2	immer
4	Einfach-Fensterglas	bei $t_{\ddot{a}} \leq 15$ min zu 80 %[1)] bei $t_{\ddot{a}} \geq 30$ min zu 100 %
5	Flächen von Öffnungen mit Abschlüssen oder Einrichtungen aus Kunststoffen mit einer Schmelztemperatur ≤ 300 °C	im Dach zu 100 % in der oberen Wandhälfte bei $t_{\ddot{a}} \leq 15$ min zu 50 %[1)] bei $t_{\ddot{a}} \geq 30$ min zu 100 %
6	Flächen mit Materialien, die bei Brandeinwirkungen gemäß ETK (DIN 4102) nach höchstens 15 min zerstört werden	bei $t_{\ddot{a}} > 15$ min zu 100 %, sonst nicht
7	Verglasungen mit handelsüblichem Zweischeibenisolierglas	bei $t_{\ddot{a}} \leq 15$ min zu 35 %[2)] bei $t_{\ddot{a}} > 15$ min zu 50 %[2)] bei $t_{\ddot{a}} > 30$ min zu 100 %
8	Flächen von Wärmeabzugsöffnungen	bei $t_{\ddot{a}}$ (ohne diese Flächen) > Auslösezeit nach DIN 18232-7
9	Brandschutzverglasung	nie
10	angriffshemmende Verglasung	nie
11	Drahtglas mit kreuzweisen Drähten	nie
12	Verbundsicherheitsglas	nie

1) Bei Vorhandensein einer Werkfeuerwehr darf der Wert zu 100 % angesetzt werden.
2) Bei Vorhandensein einer Werkfeuerwehr darf der Wert verdoppelt werden.

Tabelle 4. Beispiel für die iterative Anrechnung von Öffnungsflächen

Angerechnete Öffnungsflächen	Für $t_{\ddot{a}} \leq 15$ min anrechenbar	Für $t_{\ddot{a}} \leq 30$ min anrechenbar	Für $t_{\ddot{a}} > 30$ min anrechenbar
1. Beispiel Ergebnis:	$t_{\ddot{a}} = 10$ min es gilt $t_{\ddot{a}} = 10$ min		
2. Beispiel Ergebnis:	$t_{\ddot{a}} = 35$ min		
	neue Rechnung Ergebnis:	$t_{\ddot{a}} = 25$ min es gilt $t_{\ddot{a}} = 35$ min	
3. Beispiel Ergebnis:	$t_{\ddot{a}} = 45$ min		
	neue Rechnung Ergebnis:	$t_{\ddot{a}} = 35$ min	
		neue Rechnung Ergebnis:	$t_{\ddot{a}} = 28$ min es gilt $t_{\ddot{a}} = 35$ min

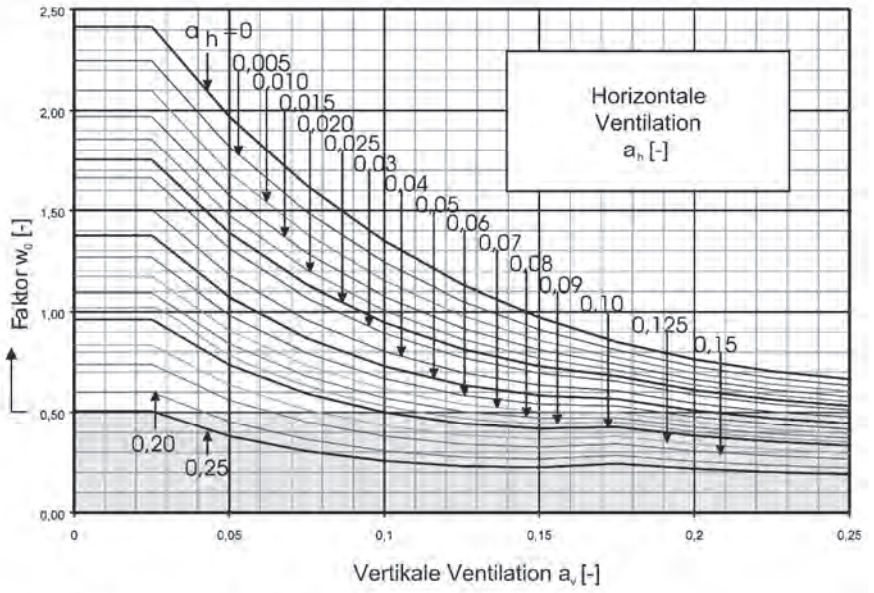
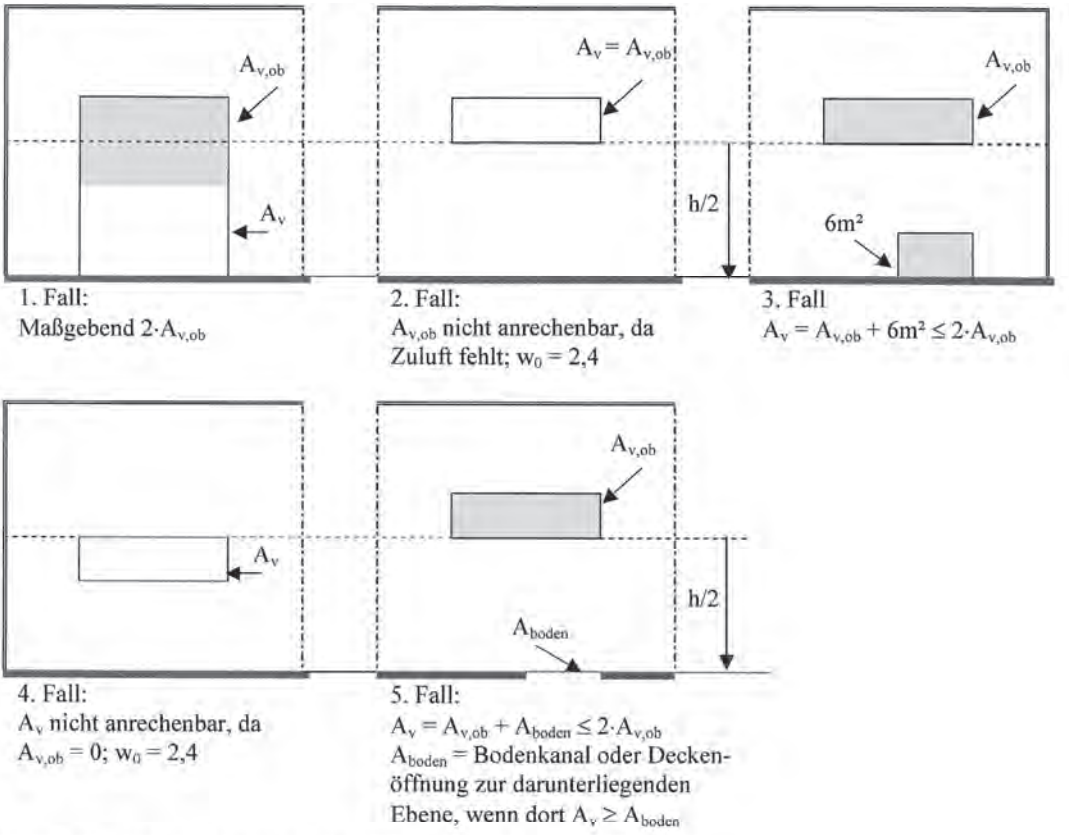


Bild 10. Faktor w_0 in Abhängigkeit von a_v und a_h nach DIN 18230-1



1. Fall:
Maßgebend $2 \cdot A_{v,ob}$

2. Fall:
$A_{v,ob}$ nicht anrechenbar, da Zuluft fehlt; $w_0 = 2{,}4$

3. Fall
$A_v = A_{v,ob} + 6m^2 \leq 2 \cdot A_{v,ob}$

4. Fall:
A_v nicht anrechenbar, da $A_{v,ob} = 0$; $w_0 = 2{,}4$

5. Fall:
$A_v = A_{v,ob} + A_{boden} \leq 2 \cdot A_{v,ob}$
A_{boden} = Bodenkanal oder Deckenöffnung zur darunterliegenden Ebene, wenn dort $A_v \geq A_{boden}$

Bild 11. Beispiel für anrechenbare vertikale Öffnungsflächen für $a_h < 0{,}005$

2.6.5 Grundgleichungen

Der Wärmeabzugsfaktor w wird nach Abschnitt 8.3 der Norm ermittelt. Die Berechnung von w_0 für den globalen Nachweis erfolgt unter Verwendung der Eingangsgrößen

A_v Fläche der vertikalen Öffnungen
$A_{v,ob}$ Fläche der vertikalen Öffnungen in der oberen Hälfte der Außenwände
A_h Fläche der horizontalen Öffnungen
A Fläche des Bemessungsabschnittes

Es werden folgende bezogene Öffnungsflächen ermittelt:

$$0{,}025 \le a_v = A_v/A \le 0{,}25 \qquad (13)$$

$$a_h = A_h/A \qquad (14)$$

Bei Brandbekämpfungsabschnitten mit geringen horizontalen Öffnungsflächen (< 0,5%) oder ausschließlich vertikalen Öffnungen dürfen nur solche vertikalen Öffnungsflächen angerechnet werden, die in der oberen Hälfte der Wandflächen angeordnet sind ($A_{v,ob}$), zuzüglich eines maximal gleich großen Anteils von Wandöffnungen in der unteren Hälfte (Zuluft) der Wandflächen

$$\text{für } a_h < 0{,}5\text{: } A_v = \min(A_v; 2 \cdot A_{v,ob}) \qquad (15)$$

Öffnungen, die ausschließlich in der unteren Hälfte von Wänden angeordnet sind, dürfen bei fehlenden horizontalen Öffnungen bei der Berechnung des Wärmeabzugsfaktors w nicht angerechnet werden. Es ist dann der maximale Faktor $w_0 = 2{,}4$ anzusetzen.
Der Wärmeabzugsfaktor w wird aus einem Grundwert w_0, bei dem die Größe und Anordnung der Öffnungen eingehen, und einem Faktor α_w berechnet, bei dem die mittlere Höhe des Bemessungsabschnittes berücksichtigt wird. Der Faktor w errechnet sich aus:

$$w = w_0 \cdot \alpha_w \ge 0{,}5 \qquad (16)$$

Der Grundwert w_0 wird ermittelt aus der Beziehung

$$w_0 = \frac{1{,}0 + 145 \cdot (0{,}40 - a_v)^4}{1{,}6 + \beta_w \cdot a_h} \ge 0{,}5 \qquad (17)$$

mit

$$\beta_w = 20 \cdot (1 + 10 \cdot a_v - 64 \cdot a_{v2}) \ge 16 \qquad (18)$$

Die Auswertung der Berechnungen des Grundwertes für w_0 zeigt die in Bild 10 dargestellten Ergebnisse. In dieser Darstellung ist die vertikale Ventilation a_v an der Längsachse einzusetzen. Die horizontale Ventilation a_h ist als Kurvenparameter verwendet. Für dazwischen liegende Werte von a_h darf interpoliert werden. Aus Bild 10 ist ersichtlich, für welche Kombinationen von a_h und a_v sich Faktoren w_0 ergeben würden, die < 0,5 sind. In diesen Fällen muss für $w_0 = 0{,}5$ angesetzt werden.
Der Einfluss der Höhe h des Bemessungsabschnittes auf den Wärmeabzugsfaktor w nach Gl. (16) wird mit dem Faktor α_w berücksichtigt (vgl. Bild 2 der Norm). Er ergibt sich zu

$$\alpha_w = \left(\frac{6{,}0}{h}\right)^{0{,}3} \qquad (19)$$

mit

h mittlere Höhe des Bemessungsabschnitts

2.6.6 Globaler Nachweis

Für **eingeschossige Brandbekämpfungsabschnitte** ohne Ebenen ist bei der Berechnung von q_R sowie a_v und a_h als Bezugsfläche die Fläche des Brandbekämpfungsabschnitts entsprechend der Grundfläche A_G anzusetzen. Als Höhe h in Gl. (19) des Bemessungsabschnitts gilt die mittlere Höhe von der Grundebene bis zum Dach (s. Bild 12). Brandbekämpfungsabschnitte nur mit Bühnen oder Einbauten, die entsprechend der MIndBauRL **nicht bemessen** werden müssen, werden als eingeschossige Brandbekämpfungsabschnitte behandelt: Brandlasten und Öffnungsflächen werden auf die Grundfläche A_G des Brandbekämpfungsabschnittes bezogen, Höhe h wie vor. Es gibt keine Ebenennachweise.
Für Brandbekämpfungsabschnitte mit **Ebenen die bemessen** werden, ist für den globalen Nachweis bei der Berechnung von q_R sowie a_v und a_h als Bezugsfläche die Fläche A_B des Brandbekämpfungsabschnittes entspre-

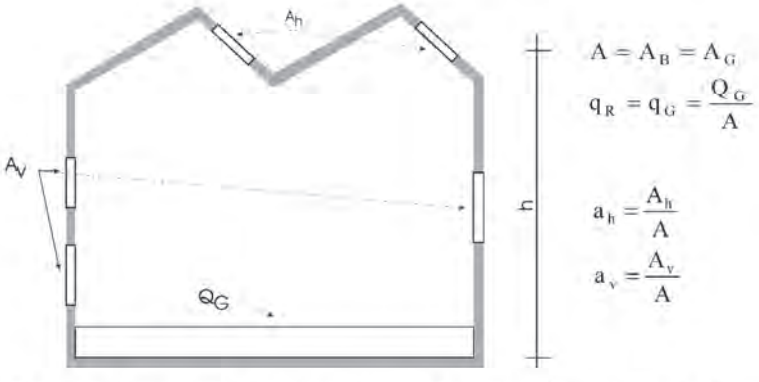
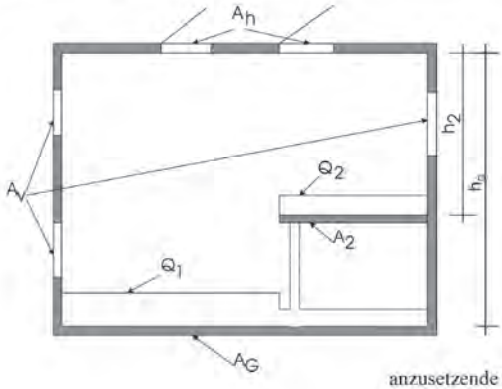


Bild 12. Berechnungsannahmen bei eingeschossigen Brandbekämpfungsabschnitten ohne Ebenen



$$A = A_B = A_G + A_2$$

$$q_R = q_B = \frac{Q_1 + Q_2}{A}$$

$$a_h = \frac{A_h}{A}$$

$$a_v = \frac{A_v}{A}$$

anzusetzende Höhe h:

$A_h/A_G < 0{,}2$ $\quad h = h_G \cdot A_G/A$

$A_h/A_G \geq 0{,}2$; $(A_G - A_2)/A_G \geq 0{,}2$ $\quad h = h_G$

Bild 13. Berechnungsannahmen bei Brandbekämpfungsabschnitten mit Ebenen, welche brandschutztechnisch bemessen sind *(globaler Nachweis)*

chend Gl. (3) anzusetzen. Beim globalen Nachweis (Bild 13) dürfen nur die ins Freie führenden Öffnungen angesetzt werden. Als Höhe h des Bemessungsabschnitts gilt

- generell die gemittelte Raumhöhe der Ebenen,
- für Öffnungsflächen $A_h/A_G > 0{,}2$, übereinanderliegend und im Dach, die mittlere Höhe von der Grundebene bis zum Dach.

Zusätzlich sind Ebenennachweise für die Bauteilbemessung zu führen. Für Brandbekämpfungsabschnitte mit einer Brandbelastung bis zu 60 kWh/m² je Ebene und bis zu 100 kWh/m² auf Teilflächen darf anstelle des globalen Nachweises das flächenmäßig gewichtete Mittel der äquivalenten Branddauern der Ebenen angesetzt werden.

2.6.7 Teilabschnitte

Statt des globalen Nachweises dürfen, unter den Voraussetzungen wie sie unter Abschnitt 2.3.4 beschrieben sind, Teilabschnitte betrachtet werden. Hierfür wird zunächst der Wärmeabzugsfaktor w nach Abschnitt 2.6.5 für den Brandbekämpfungsabschnitt ermittelt. Dieser darf gemäß Anhang C der Norm abgemindert werden, wenn sichergestellt ist, dass sich die Rauchgase im gesamten Brandbekämpfungsabschnitt verteilen können. Davon ist auszugehen, wenn der Teilabschnitt mindestens an zwei Seiten in offener Verbindung zum Brandbekämpfungsabschnitt steht und diese „Öffnungsfläche" mindestens 25% der Fläche A_A beträgt. Der Wärmeabzugsfaktor w_A bestimmt sich dann aus Gl. (20) wobei auch für $w_A \geq 0{,}5$ zu beachten ist:

$$w_A = w \cdot \left(0{,}45 + \frac{A_A}{A}\right) \leq w \qquad (20)$$

mit

A_A Teilabschnittsfläche in m²

$A = A_G$ Grundfläche des Brandbekämpfungsabschnitts in m²

2.6.8 Teilflächen mit ungleichmäßig verteilter Brandbelastung

Zusätzlich zum globalen Nachweis müssen, unter den Bedingungen wie sie in Abschnitt 2.3.5 beschrieben sind, Teilflächen untersucht werden. Der Wärmeabzugsfaktor darf für die Teilfläche abgemindert werden, wenn die Teilfläche, wie in Abschnitt 2.6.7 beschrieben, in offener Verbindung zum Brandbekämpfungsabschnitt oder zur betrachteten Ebene steht. Es gelten die folgenden Bezeichnungen, wobei auch hier $w_T \geq 0{,}5$ zu beachten ist:

$$w_T = w \cdot \left(0{,}45 + \frac{A_T}{A}\right) \leq w \qquad (21)$$

mit

A_T Teilfläche in m²

A Fläche des Brandbekämpfungsabschnitts oder der Ebene in m²

Für Teilflächen innerhalb von Teilabschnitten ist $A = A_B$ und w für den Brandbekämpfungsabschnitt zu bestimmen.

2.6.9 Teilflächen mit ungleichmäßig verteiltem Wärmeabzug

Bei Brandbekämpfungsabschnitten mit ungleichmäßig verteilten horizontalen Wärmeabzügen werden – ausgehend vom globalen Nachweis mit der auf die Fläche des Brandbekämpfungsabschnitt A_B bezogenen Öffnungsfläche ($a_h = A_h/A_B$) – Teilfläche $A_T \geq 0{,}25\ A_B$ betrachtet. Für diese Teilflächen werden die anteiligen horizontalen Öffnungsflächen $A_{h,T}$ bestimmt ($a_{h,T} = A_{h,t}/A_T$). Wenn

$$a_{h,T} < 0{,}5\ a_h \qquad (22)$$

muss ein Teilflächennachweis geführt werden. Für $a_{h,T} < 0{,}5\ a_h$ darf w nicht entsprechend Gl. (21) abgemindert werden.

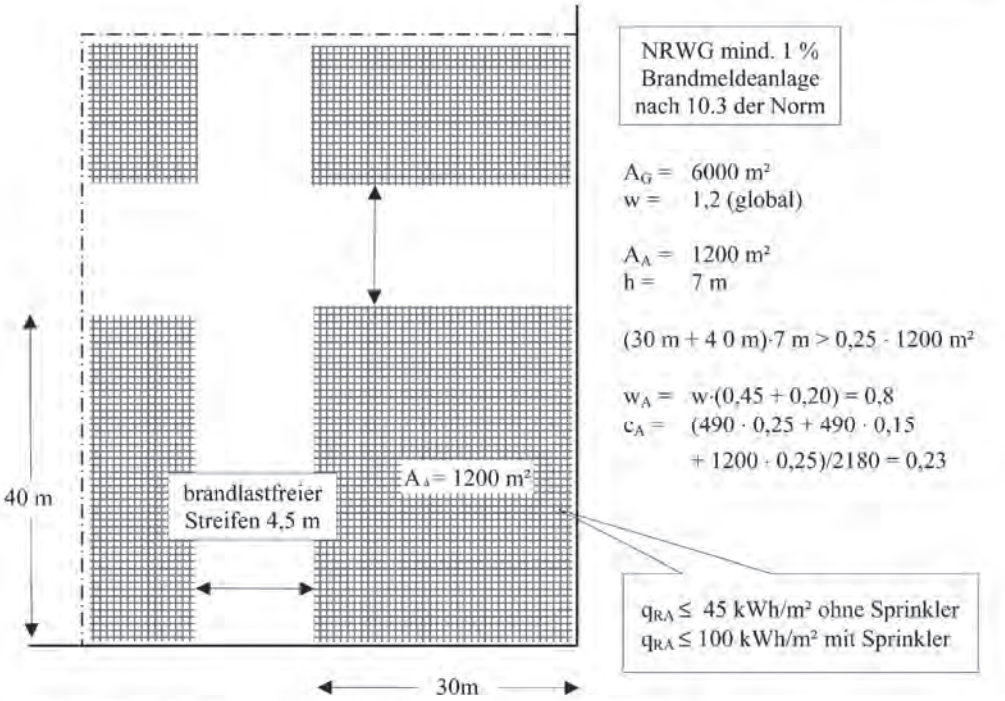
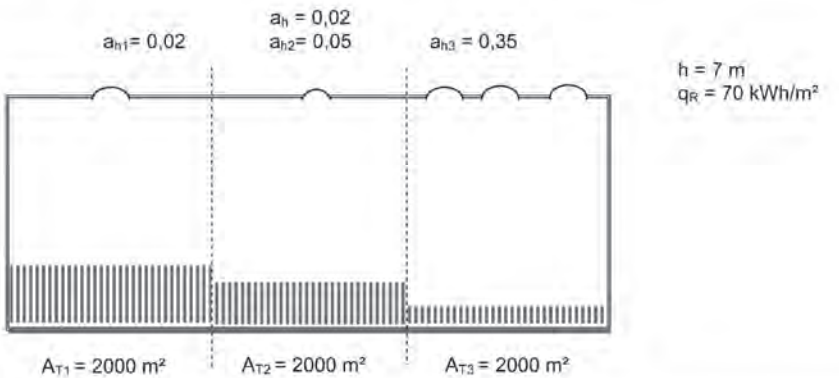


Bild 14. Beispiel für Teilabschnitt nach Anhang A der Norm (Grundriss, Ausschnitt)



	A, A_i (m²)	$a_v = a_{vi}$ > 0,025	A_h, A_{hi} (m²)	a_h, a_{hi}	w	q_R, q_{Ri} (kWh/m²)	t_a, t_{ai} (min.)	maßgebend t_{ai} (min.)
Globaler Nachweis	6000	(0,01) 0,025	120	0,02	1,77	70	31	
Teilfläche 1	2000	(0,01) 0,025	40	0,02	1,77[1)]	90	31	31 bzw. 43[2)]
Teilfläche 2	2000		10	0,005 < 0,01	2,15	80	43	43
Teilfläche 3	2000		70	0,035	1,51	40	(15)	31 bzw. 43[2)]

1) wegen $a_{h,i} > 0{,}5\ a_h$ darf w_i bestimmt werden: $w_i = 1{,}77 \cdot (0{,}45 + 0{,}33) = 1{,}386$
2) max. t_{ai} ist maßgebend, wenn die statischen Systeme der Teilflächen nicht voneinander unabhängig sind

Bild 15. Beispiel für Teilflächen mit ungleichmäßig verteiltem horizontalem Wärmeabzug

2.6.10 Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Ebenen

Für Brandbekämpfungsabschnitte mit **mehreren Ebenen,** die bemessen sind, ist für den *Ebenennachweis* der Wärmeabzugsfaktor w_i für jede Ebene zu ermitteln. Für die Berechnung von q_{Ri} sowie von a_{vi} und a_{hi} nach den Gln. (13) und (14) ist als Bemessungsabschnitt die jeweilige Ebenenfläche $A_{E,i}$ und die Ebenenhöhe h_i anzusetzen (Ausnahme s. Abschn. 2.6.10.2). Beispiele für Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Ebenen werden in Abschnitt 3 behandelt.

Der Wärmeabzug über freie Deckenöffnungen kann vereinfachend vernachlässigt oder entsprechend den nachfolgenden Ausführungen gemäß Anhang B der Norm berücksichtigt werden. Wird ein Wärmeabzug über freie Deckenöffnungen berücksichtigt, ist für jede Ebene ausreichende Nachströmung im unteren Raumbereich sicherzustellen. Unter Beachtung der Bedingung von Gl. (15) dürfen Öffnungsflächen im Fußboden der Ebene i auf die Fläche A_{vi} angerechnet werden, wenn diese mit vertikalen Öffnungen der Ebene i in direkter Verbindung stehen und in den darunter liegenden Ebenen entsprechende vertikale Öffnungsflächen vorhanden sind (vgl. Bild 11, 5. Fall).

Bei unterschiedlich großen Öffnungsflächen dürfen diese nur mit der Fläche angerechnet werden, die auch in allen darüberliegenden Ebenen, einschließlich Dach vorhanden sind.

2.6.10.1 Öffnungen < 20 % in den Decken und im Dach

Öffnungen in den Decken mit einer Mindestgröße von 1 m² dürfen als horizontale Wärmeabzugsflächen für die jeweilige Ebene angerechnet werden, wenn sie in allen Decken und im Dach

- gleich groß und übereinanderliegend angeordnet sind, oder
- gleichmäßig verteilt sind; als gleichmäßig verteilt gelten Öffnungen, wenn jeweils mindestens eine Öffnung > 1 m² auf 400 m² in übereinanderliegenden Bezugsflächen vorhanden ist. Um die Wärmeentlastung über Öffnungsflächen in den Decken ansetzen zu können, müssen die Flächen im Dach ständig offen sein bzw. frühzeitig geöffnet werden; ein frühzeitiges Öffnen kann ohne besonderen Nachweis nur für Rauch- und Wärmeabzugsgeräte nach DIN EN 12101-2 angenommen werden.

Haben alle Ebenen die gleiche Raumhöhe h_i oder werden diese nach oben größer, so darf der Wärmeabzugsfaktor w_i nach Gl. (16) bestimmt werden. Ist die Höhe h_{i+1} der darüberliegenden Ebene i + 1 gleich der Hälfte von h_i, dann ist der Wärmeabzugsfaktor der Ebene i um 25 % zu vergrößern; für Zwischenwerte gilt:

$$w_i \text{ (für } h_{i+1} < h_i) = w_i + 0{,}25 \cdot w_i \cdot (h_i - h_{i+1})/0{,}5\, h_i \quad (23)$$

Sind Öffnungen *nicht* übereinanderliegend oder gleichmäßig verteilt, ist der Wärmeabzugsfaktor w_i mittels Ingenieurmethoden oder ohne Berücksichtigung der Öffnungsflächen in den Decken zu bestimmen.

Alternativ kann die äquivalente Branddauer $t_{ä,Ei}$ der Ebenen mit folgender Näherung ermittelt werden: Für die Ermittlung des Wärmeabzugsfaktors ist die maßgebende horizontale Öffnungsfläche mit $\alpha_h = 0{,}8$ abzumindern. Neben der rechnerischen Brandbelastung $q_{R,i}$ ist ein zusätzlicher Anteil der rechnerischen Brandbelastung $q_{R,i-1}$ infolge der unterstellten Brandübertragung aus der sich unter der Ebene i befindenden Ebene i – 1 zu berücksichtigen:

$$t_{ä,Ei} = c_i \cdot w_i \,(q_{R,i} + \beta_v \cdot q_{R,i-1}) \quad (24)$$

Darin sind

- $t_{ä,Ei}$ äquivalente Branddauer in der Ebene i in min
- c_i Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung der Umfassungsbauteile in der Ebene i
- w_i Wärmeabzugsfaktor für die Ebene i
- q_{Ri} rechnerische Brandbelastung in der Ebene i in kWh/m²
- q_{Ri-1} rechnerische Brandbelastung in der Ebene i – 1 in kWh/m²
- β_v dimensionsloser Faktor zur anteiligen Berücksichtigung der rechnerischen Brandbelastung q_{Ri-1} in der Ebene i. Ohne weiteren Nachweis darf $\beta_V = 0{,}3$ angesetzt werden.

Für Ebenen mit $a_v \le 0{,}025$ ist die Näherung nur dann günstiger als die Annahme geschlossener Decken, wenn $0{,}8 \cdot a_{hi} \cdot q_{Ri} > 0{,}02 \cdot q_{Ri-1}$.

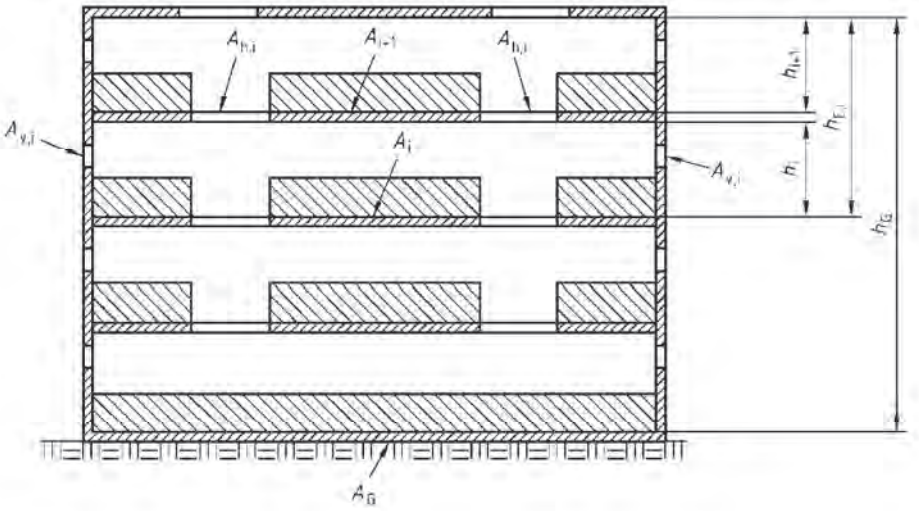
Unabhängig davon wie $t_{ä,Ei}$ bestimmt wurde, ist für $t_{ä,Ei} < t_{ä,Ei-1}$, unter den Bedingungen von Abschnitt 4.1.4 der Norm (s. Abschn. 2.3.7 in diesem Beitrag) $t_{ä,Ei} = t_{ä,Ei-1}$ zu setzen.

2.6.10.2 Übereinanderliegende Öffnungen ≥ 20 % in den Decken und im Dach

Bei Brandbekämpfungsabschnitten mit übereinanderliegenden Öffnungen in den Decken und im Dach (s. Bild 16) mit horizontalen Öffnungsflächen ≥ 20 % erfolgt eine Berücksichtigung des Kamineffektes durch den Ansatz größerer Höhen als nur der Ebenenhöhe h_i. Als Höhe h des Bemessungsabschnitts in Gl. (19) darf der Abstand zwischen dem Fußboden der jeweiligen Ebene und der Unterkante der Dachdecke anzusetzen. Der globale Nachweis darf auf der Grundlage der Ebenennachweise geführt werden (s. Bild 16).

2.6.10.3 Bemessene Bühnen

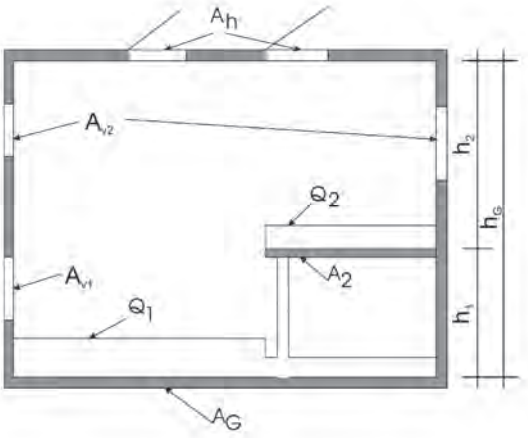
Da der Normtext sich vornehmlich auf Ebenen bezieht, die sich von Außenwand zu Außenwand erstrecken, wird hier noch der Fall behandelt, dass eine Ebene – wie eine bemessene Bühne – in den Brandbekämpfungsabschnitt hineingestellt ist.



Legende:

A_B Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes in m² ($A_B = A_G + \Sigma A_i$)
A_G Grundfläche des Brandbekämpfungsabschnittes in m²
A_i Fläche der betrachteten Ebene *i* in m²
$A_{v,i}$ Fläche der vertikalen Öffnungen in den Außenwandflächen der Ebene *i* in m²
$A_{h,i}$ Fläche der horizontalen Öffnungen in der Decke der Ebene *i* in m²
h_G Höhe des Brandbekämpfungsabschnittes in m
$h_{E,i}$ Höhe zwischen der Oberkante Fußboden der Ebene *i* und der Unterkante Dachdecke in m
h_i Höhe der Ebene *i* in m

Bild 16. Brandbekämpfungsabschnitt mit übereinanderliegenden Öffnungen in Ebenen mit klassifiziertem Feuerwiderstand und Öffnungen im Dach ≥ 20 %



Ebene 1 ($A_G - A_2 > AV_2 + A_h$):

$$q_R = \frac{Q_1}{A_G}; \quad a_h = \frac{A_h}{A_G}; \quad a_v = \frac{A_{v1} + A_{v2}}{A_G}$$

- für die Bemessung der Ebene 2 ist h = h1
  wobei fallweise noch ein Teilflächennachweis zu führen ist
- für die Bemessung des Dachtragwerks ist $h = h_G$

Ebene 2 ($A_G - A_2 > A_{V1}$):

$$q_R = \frac{Q_2}{A_2}; \quad a_h = \frac{A_h}{A_2}; \quad a_v = \frac{A_{v1} + A_{v2}}{A_2}$$

für die Bemessung des Dachtragwerks ist $h = h_2$

Bild 17. Berechnungsannahmen bei Brandbekämpfungsabschnitten mit Ebenen (Bühnen), welche brandschutztechnisch bemessen sind (*Ebenennachweise*)

2.7 Sicherheitsbeiwerte und Zusatzbeiwerte

2.7.1 Sicherheitsbeiwert γ

Entsprechend ihrer brandschutztechnischen Bedeutung werden

- an eingeschossige Gebäude und an Gebäude mit mehreren Geschossen/Ebenen und
- an die einzelnen Bauteile

unterschiedliche Anforderungen gestellt. Den unterschiedlichen Anforderungen bei den Bauteilen wird mit drei Brandsicherheitsklassen (SK_b3 bis SK_b1) Rechnung getragen – vgl. hierzu die entsprechenden Vorgaben der MIndBauRL. In Abhängigkeit der Brandsicherheitsklassen SK_b und der Fläche des Brandbekämpfungsabschnitts nach Gl. (3) sind die Sicherheitsbeiwerte γ der Tabelle 5 zu entnehmen. Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

2.7.2 Zusatzbeiwert α_L

Der Zusatzbeiwert α_L erfasst den Einfluss der brandschutztechnischen Infrastruktur auf die Brandausbreitung. Es dürfen berücksichtigt werden: eine anerkannte Werkfeuerwehr nach 10.2, automatische Brandmeldeanlagen nach 10.3 und Feuerlöschanlagen nach 10.4 oder 10.5 der Norm. Die Ermittlung des Zusatzbeiwertes α_L erfolgt nach Tabelle 6 als Produkt der Einzelwerte gemäß Spalte 5. Bei geringer rechnerischer

Tabelle 5. Sicherheitsbeiwerte γ

1	2	3	4	5	6	7
Fläche des Brandbekämpfungs- oder Teilabschnitts	Gebäude mit einem Geschoss ohne Ebenen			Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Geschossen oder Ebenen		
m²	SK_b3	SK_b2	SK_b1	SK_b3	SK_b2	SK_b1
≤ 2 500	1,00	0,60	0,50	1.25	0,90	0,50
5 000	1,05	0,60	0,50	1,35	1,00	0,60
10 000	1,10	0,70	0,50	1,45	1,10	0,70
20 000	1,20	0,80	0,50	1,55	1,20	0,80
30 000	1,25	0,90	0,50	1,60	1,25	0,90
60 000	1,35	1,00	0,55	–	–	–
120 000	1,50	1,10	0,60	–	–	–

Tabelle 6. Zusatzbeiwerte α_L

1			2	3	4	5
Werkfeuerwehr			Brandmeldeanlage nach 10.3 der Norm	halbstationäre Löschanlage nach 10.5 der Norm	selbsttätige Feuerlöschanlage nach 10.4 der Norm	α_L [1]
Schichtstärke (Personen)	hauptberuflich	nebenberuflich				
keine	1,0	1,0	0,90	1,0[2]	0,60	Produkt der Spalten (1) × (2) × (3) oder (1) × (2) × (4)
1 Staffel (6)	0,90	0,95	0,95	0,85		
1 Gruppe (9)	0,85	0,90				
2 Staffeln (12)	0,80	0,85				
3 Staffeln (18)	0,70	0,80				
4 Staffeln (24)	0,60	0,75				

1) Sofern zu den Spalten 1 bis 4 keine anrechenbaren Maßnahmen vorhanden sind, ist der Tabellenwert jeweils mit 1,0 anzusetzen.
2) 0,95 mit Zustimmung der zuständigen öffentlichen Feuerwehr.
Anmerkung: Die Aufschaltung auf eine ständig besetzte Stelle (Brandmeldung) ist bei selbsttätigen Feuerlöschanlagen bereits im Zusatzbeiwert $\alpha_L = 0{,}6$ berücksichtigt, d. h., der zusätzliche Wert 0,90 bzw. 0,95 nach dieser Tabelle, Spalte 2, bleibt in der Regel ohne Ansatz (Ausnahme s. 10.3 der Norm), sofern keine zusätzliche automatische Brandmeldeanlage verwendet wird.

Brandbelastung darf der Zusatzbeiwert α_L abgemindert werden, und zwar
- auf 80 % bei $q_R \leq 45$ kWh/m²,
- auf 90 % bei $q_R \leq 100$ kWh/m²,

wenn die Gesamtbewertung der Maßnahmen nach Tabelle 6, Spalte 5, $\alpha_L \leq 0{,}85$ ergibt.

Eine Werkfeuerwehr darf nur berücksichtigt werden, wenn diese nach landesrechtlichen Vorschriften anerkannt ist. Außerdem werden eine frühzeitige Entdeckung eines Brandes und eine sofortige Alarmierung der Werkfeuerwehr vorausgesetzt. Bei haupt- und nebenberuflichen Kräften darf der Wert entsprechend der Anteile gewichtet werden.
Eine automatische Brandmeldeanlage darf nur berücksichtigt werden, wenn diese den allgemein anerkannten Regeln der Technik entspricht (z. B. DIN EN 54). In Brandbekämpfungsabschnitten, in denen durch ständige Personalbesetzung eine flächendeckende sofortige Brandentdeckung und Weitermeldung sichergestellt ist, kann dies hinsichtlich der Branderkennung und -meldung einer automatischen Brandmeldeanlage gleichgesetzt werden.
Soweit, in Abhängigkeit von der zu erwartenden Brandentwicklung, ausschließlich der Maximalwert der Wärme als die zur Brandmeldung geeignete Kenngröße gilt, erfüllt auch eine Sprinkleranlage die Anforderung an die Branderkennung. Dabei muss die Weiterleitung der Brandmeldung an eine ständig besetzte Stelle nach DIN VDE 0833-2 sichergestellt sein.
Es dürfen nur selbsttätige Feuerlöschanlagen berücksichtigt werden, die für das Löschen der vorhandenen Brandlasten geeignet, entsprechend bemessen sind, den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen und von einer anerkannten Stelle abgenommen sind.
Halbstationäre Löschanlagen sind grundsätzlich nur in Verbindung mit der Werkfeuerwehr anrechenbar. Es dürfen nur halbstationäre Löschanlagen berücksichtigt werden, die von der zuständigen Brandschutzdienststelle oder der zuständigen Werkfeuerwehr begutachtet und von einem geeigneten Sachverständigen geprüft wurden. Sie dürfen nur in Ansatz gebracht werden, wenn eine automatische Branderkennung und -meldung vorhanden sind und eine Weiterleitung an eine ständig besetzte Stelle gegeben ist.
Anlagen, die bei der Ermittlung von α_L berücksichtigt werden, gelten als bauaufsichtlich notwendige Anlagen.

2.8 Zusammenfassung

In der neuen Norm DIN 18230-1 sind gegenüber der Ausgabe 1998 erhebliche Änderungen und Ergänzungen enthalten, die im Folgenden aufgeführt sind:
a) Anrechenbarkeit von Flächen,
b) Anrechenbarkeit von Öffnungen,
c) Einführung des neuen Begriffs der Ebene,
d) Präzisierung des Ebenennachweises,
e) Anrechenbarkeit des Schutzes von Einrichtungen und Teilflächen durch geeignete Feuerlöschanlagen,
f) Abtrennung von Teilabschnitten, unabhängig von der Brandbelastung.

Die Überarbeitung der Anrechenbarkeit von Flächen und Öffnungen führt zur Verbesserung der Anwendbarkeit, wenngleich es in der Praxis immer wieder Fälle geben wird, die außerhalb der Normung liegen. In diesen Fällen helfen nur ingenieurmäßige Überlegungen und praktische Erfahrungen, um offene Fragen zu klären.
Neu ist die Einführung des Begriffs der Ebene als Bauteil, welche ungeschützte Öffnungen haben darf, aber als brandschutztechnisch tragfähige Konstruktion ausgebildet ist. Durch diese Neuformulierung wurde es erforderlich, auch die Bemessung von Ebenen genauer zu regeln, weshalb eine Vielzahl von Brandsimulationen mit den Programmen MRFC, Version 3.1.15, und FDS, Version 5, durchgeführt wurden. Es ist ein Verfahren entwickelt worden, welches im genannten Anwendungsbereich durchweg auf der „sicheren Seite" liegende Werte für den Wärmeabzugsfaktor w ergibt. In diesen Fällen bietet sich die Anwendung der Ingenieurmethoden für den Brandschutz an, um günstigere Bemessungswerte für t_s zu erhalten.
Neu in der Norm ist auch die vorgesehene Abtrennung von Teilanschnitten unabhängig von der Brandbelastung, wobei relativ konservative Werte zur Anwendung kommen. Auch in solchen Fällen bietet sich ein genauerer rechnerischer Nachweis durch Brandsimulation an.
In dem Beuth-Kommentar, Baulicher Brandschutz im Industriebau, 2003, [7] ist eine alte Fassung der Normteile Teil 1 bis Teil 3 mit Erläuterungen, Beispielen und Kommentaren enthalten. Diese soll in den folgenden Monaten parallel zur MIndBauRL überarbeitet werden und etwa in einem Jahr (2011/2012) neu erscheinen.

3 Beispiele – Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Ebenen nach DIN 18230-1

3.1 Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Ebenen im Geschossbau – Definitionen

Die neue DIN 18230-1 unterscheidet in Übereinstimmung mit dem Entwurf der MIndBauRL Okt. 2010 zwischen Industriegebäuden die
- auf gleicher oder in der Höhe versetzt liegenden Räumen mit Geschossdecken, die auf die erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_f raumabschließend und standsicher bemessen sind,
- auf gleicher oder in der Höhe versetzt liegenden Räumen mit Ebenen (Decken), die nur auf erf t_f standsicher bemessen sind und freie oder mit nichtbrennbaren Baustoffen verschlossene Öffnungen beliebiger Größe aufweisen.

Decken mit Öffnungen waren bereits in der DIN 18230-1, Ausgabe 1998, geregelt, allerdings gab es für freie Öffnungsflächen zwischen 2 % und 20 % in den Deckenflächen keine Bemessungsverfahren zur Be-

stimmung von $t_ä$ bzw. erf t_f für diese Bauweisen. In der neuen Norm, Ausgabe September 2010, wurde diese Lücke geschlossen. Im Folgenden sind diesbezüglich einige Beispiele vorgestellt.

3.2 Brandbekämpfungsabschnitt mit mehreren Ebenen – globaler Nachweis

In diesem und den weiteren Beispielen werden folgende Symbole und Abkürzungen verwendet:

A_i Bodenfläche der Ebene i [m²], statt $A_{E,i}$ nach DIN 18230-1, der Index i steht für die jeweilige Ebene

Q_i Brandlast in der Ebene i [kWh], statt Q_{Ri} nach DIN 18230-1

q_i Brandbelastung in der Ebene i [kWh/m²], statt q_{Ri} nach DIN 18230-1

$A_{b,i} = A_{h,i-1}$ Öffnungsfläche im Boden der Ebene i [m²]

BBA Brandbekämpfungsabschnitt

3.2.1 Geometrie und Rechenwerte

Untersucht wird ein Industriebau von 2000 m² Grundfläche und 4 Ebenen (inklusive Erdgeschoss) und einer Höhe h von insgesamt 18 m gemäß der in Bild 18 dargestellten Geometrie. Die den Ebenen i (i = 1 bis 4) zugeordneten Brandlasten Q_i, Ebenenflächen A_i sowie Öffnungen $A_{v,i}$ und $A_{h,i}$ und der Umrechnungsfaktor c sind in Tabelle 7 angegeben.

3.2.2 Nichtbemessene Ebenen bzw. Bühnen

Bezugsfläche: $A_B = A_1$
Brandlast: $Q_B = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Brandbelastung: $q_B = Q_B/A_B$
für: $A_1 = 2000$ m², $Q_B = 325$ MWh; $q_B = 163$ kWh/m²

Wärmeabzugsfaktor w aus:
$a_h = A_h/A_B$
$a_v = (A_{v,1} + A_{v,3})/A_B$
$\alpha_w = (6{,}0/h)^{0{,}3}$

ergibt für: $A_h = 40$ m²; $A_{v,1} + A_{v,3} = 40$ m² + 10 m²; $w = 1{,}33$; $t_ä = c \cdot q_B \cdot w = 54$ min

Der berechnete $t_ä$-Wert darf selbstredend auch für bemessene Ebenen angewendet werden, weil er auf der sicheren Seite liegt.

3.2.3 Bemessene Ebenen (Decke mit Öffnungen)

Bezugsfläche: $A_B = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$
Brandlast: $Q_B = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Brandbelastung: $q_B = Q_B/A_B$

ergibt für: $A_B = 5500$ m²; $Q_B = 325$ MWh; $q_B = 59$ kWh/m²

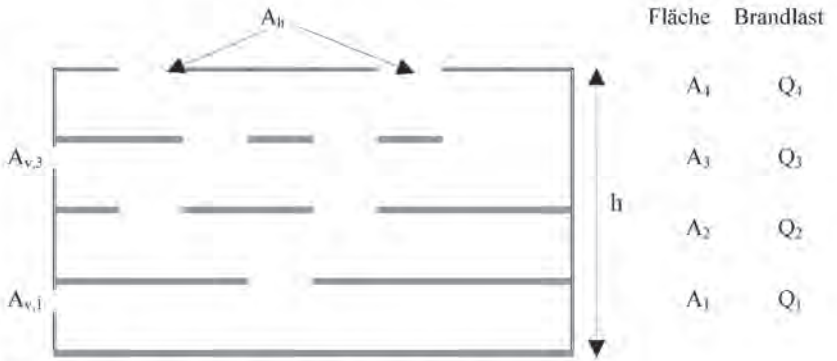


Bild 18. Schematische Darstellung der Geometrie des Industriebaus

Tabelle 7. Geometrie und Rechenwerte des Industriebaus

	A_i [m²]	Q_i [kWh]	q_i [kWh/m²]	$A_{v,i}$ [m²]	$A_{h,i}$ [m²]	h_i [m]	c
4	500	12500	25		40	4	0,25
3	1500	75000	50	10		4	0,25
2	1500	37500	25	40		4	0,25
1	2000	200000	100			6	0,25
$\sum$	5500	325000		50	40	18	0,25

Wärmeabzugsfaktor w aus:
$a_{fi} = A_h/A_B$
$a_v = (A_{v,1} + A_{v,3})/A_B$
$\alpha_w = (6{,}0/h)^{0{,}3}$

ergibt für: $A_h = 40\ m^2$; $A_{v,1} + A_{v,3} = 40\ m^2 + 10\ m^2$;
$w = 1{,}57$; $t_{\ddot{a}} = 23$ min

3.3 Brandbekämpfungsabschnitt mit mehreren Ebenen – Deckenöffnungen < 20 %

3.3.1 Geometrie und Rechenwerte

Die Ebenen werden für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer bemessen. Bei den Deckenöffnungen handelt es sich um freie Öffnungen ohne Brandbelastung (s. Bild 19).

Für die Vergleichbarkeit der Ebenennachweise mit dem vorangegangenen Beispiel (Abschn. 3.2) werden die Brandbelastungen q_i auf den Ebenen gleich gelassen (s. Tabelle 8).

3.3.2 Globaler Nachweis

Der globale Nachweis dient der Bestimmung von $t_{\ddot{a}}$ als Eingangsgröße in die MIndBauRL für die Ermittlung zulässiger Flächen von Brandbekämpfungsabschnitten. Für den globalen Nachweis werden die Geschosse „nebeneinandergelegt", die Deckenöffnungen bleiben außer Acht.

Bezugsfläche: $A_B = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 7.400\ m^2$
Brandlast: $Q_B = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 382{,}5$ MWh
Brandbelastung: $q_B = Q_B/A_B = 51{,}7\ kWh/m^2$

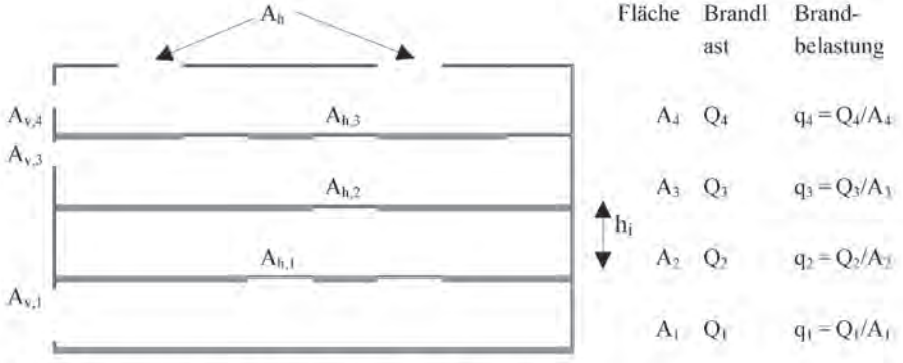


Bild 19. Schematische Darstellung der Geometrie des Industriebaus

Tabelle 8. Geometrie und Rechenwerte des Industriebaus

Ebene	A_i [m²]	Q_i [kWh]	q_i [kWh/m²]	$A_{v,i}$ [m²]	$A_{h,i}$ [m²]	h_i [m]	c [–]
4	1.700	42.500	25	6	60	4	0,25
3	1.900	95.000	50	60	300	4	0,25
2	1.800	45.000	25		100	4	0,25
1	2.000	200.000	100	96	200	6	0,25
$\sum$	7.400	382.500	–	162	–	18	–

Tabelle 9. Für die Öffnungsflächen i = 1 bis 4 geltende Anmerkungen

4	$A_{v,4} = 6\ m^2$ sind als Zuluftöffnungen hier nicht notwendig, die Flächen werden – als Wärmeabzugsflächen – aus Gründen der Vergleichbarkeit mit 3.2 beibehalten.
3	Von den $A_{v,3} = 60\ m^2$ müssen keine 6 m² als Zuluftöffnungen angeordnet sein.
2	Hier gibt es keinen Wärmeabzug über die Außenwand.
1	Wegen $A_{h,1}$ bzw. $a_{h,1} > 0{,}005$ können auch Öffnungen in der unteren Wandhälfte angerechnet werden. Für $A_{v,1} = 60\ m^2$ genügen 5 Tore mit 12 m²; diese Tore müssen gewaltfrei geöffnet werden können.

Wärmeabzugsfaktor w nach den Gl. (8) bis (14) der Norm:

$a_h = A_h/A_B = 60/A_B = 0{,}008$

wegen $a_h > 0{,}005$ erfolgt beim globalen Nachweis keine Berücksichtigung von Gl. (10)

$a_v = (A_{v,1}+A_{v,3}+A_{v,4})/A_B = 162/A_B = 0{,}022$
(Mindestwert nach Norm: 0,025)

$w_0 = 2{,}15$

$\alpha_w = (6{,}0/h_{i,m})^{0{,}3} = 1{,}09$

für $h_{i,m} = 4{,}5$ m (mittlere Höhe der Ebenen)

$w = 2{,}35$

Äquivalente Normbranddauer:

$t_{\ddot{a}} = c \cdot w \cdot q_B = 0{,}25 \cdot 51{,}7 \cdot 2{,}35 = 30{,}3$ min.

Wegen $q_1 > 60$ kWh/m² darf das $t_{\ddot{a}}$ des globalen Nachweises nicht durch die gemittelten $t_{\ddot{a}}$-Werte der Ebenen ersetzt werden.

3.3.3 Ebenennachweis – Deckenöffnung < 20 % Wärmeabzug (nicht gleichmäßig verteilt)

Der Nachweis erfolgt entsprechend Anhang B der Norm. Entsprechend Anhang B.1 der Norm dürfen nur Flächen $A_{h,1} \le A_{h,2} \le A_{h,3} \le A_{h,4}$ berücksichtigt werden, sodass bei diesem Beispiel die Flächen entsprechend anzupassen sind. Die Wärmeabzugsflächen im Dach dürfen als Öffnungen nur dann angerechnet werden, wenn sie (zumindest mit Fläche der Deckenöffnungen) gemäß Anhang B.1 der Norm ständig offen sind oder als Rauch- und Wärmeabzugsgeräte nach DIN EN 12101-2 ausgeführt werden.

Bei diesem Beispiel sind die Öffnungsflächen im Sinne von Anhang B.2 der Norm nicht gleichmäßig verteilt. Daher müssen die Flächen der Deckenöffnungen auf $0{,}8 \cdot A_{h,i}$ abgemindert werden und $t_{\ddot{a},i}$ entsprechend Gl. (B.3) der Norm vergrößert werden.

Die Brandlasten und die Öffnungsflächen werden je Ebene auf die Ebenenfläche A_i bezogen; $\alpha_{w,i}$ nach Gl. (14) der Norm wird für $h = h_i$ bestimmt. Wegen $h_2 < h_1$ muss der Wärmeabzugsfaktor für die Ebene 1 um 16 % vergrößert werden.

Aus den Angaben der Tabelle 10 ergibt sich ein gemittelter $t_{\ddot{a}}$-Wert der Ebenen $t_{\ddot{a},m}$ von:

$t_{\ddot{a},m} = (\sum A_i \cdot t_{\ddot{a},i})/A_B = 27$ min.

Da $t_{\ddot{a},m} < t_{\ddot{a}}$ darf wegen $q_1 > 60$ kWh/m² $t_{\ddot{a},m}$ nicht anstelle von $t_{\ddot{a}}$ gesetzt werden.

Öffnungsflächen zwischen den Ebenen > 20 m²

Gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm (Fall d) ist für $t_{\ddot{a},i} > t_{\ddot{a}}$ bei Bodenöffnungen > 20 m² für die darüberliegende Ebene die höhere äquivalente Branddauer maßgebend (s. Tabelle 11).

Man erhält für alle Ebenen kleinere $t_{\ddot{a}}$-Werte als bei Annahme von geschlossenen Decken. Gegenüber dem Beispiel aus Abschnitt 3.2 müssen die Öffnungsflächen $A_{v,3}$ auch hier für $t_{\ddot{a}} < 30$ min zur Verfügung stehen.

3.4 BBA ohne Deckenöffnungen

In diesem Beispiel haben die Decken keine Öffnungen, wie in Bild 20 dargestellt. Die Ebenen werden für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer bemessen (Tragfähigkeit und Raumabschluss). Es sind keine Maßnahmen gegen Feuerüberschlag an den Außenwänden vorgesehen; es handelt sich somit um einen mehrgeschos-

Tabelle 10. Geometrie und Rechenergebnisse

	A_i	$A_{v,i}$	$A_{h,i}$	$0{,}8 \cdot A_{h,i}$	$A_{h,i}$ wegen B1	$a_{v,i} = A_{v,i}/A_i \ge 0{,}025$	$a_{h,i} = A_{h,i}/A_i$	$w_{0,i}$	w_i	$t_{\ddot{a},i} = c \cdot w_i \cdot (q_i + 0{,}3 \cdot q_{i-1})$
4	1700	6	60	60	60	0,004 (0,025)	0,035	1,58	1,78	17,8
3	1900	60	300	240	60	0,032	0,032	1,54	1,73	24,9
2	1800	0	100	80	60	0 (0,025)	0,033	1,61	1,81	25,0
1	2000	96	200	160	60	0,048	0,030	1,34	1,56[1)]	39,0

1) um 16 % vergrößert

Tabelle 11. Anpassung von $t_{\ddot{a},i}$ gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm

	$t_{\ddot{a},i}$	Bewertung für Deckenöffnungen > 20 m²	$t_{\ddot{a},i}$ für > 20 m²	Vergleich mit $t_{\ddot{a}}$	$t_{\ddot{a},i}$ maßgebend
4	17,8	$t_{\ddot{a},3} > t_{\ddot{a},4}$ aber $t_{\ddot{a},3} < t_{\ddot{a}}$	17,8	< 30	17,8
3	24,9	$t_{\ddot{a},2} > t_{\ddot{a},3}$ aber $t_{\ddot{a},2} < t_{\ddot{a}}$	24,9	< 30	30,0
2	25,0	wegen $t_{\ddot{a},1} > t_{\ddot{a},2}$ ist $t_{\ddot{a},1}$ maßgebend	39,0	> 30	39,0
1	39,0		39,0	> 30	39,0

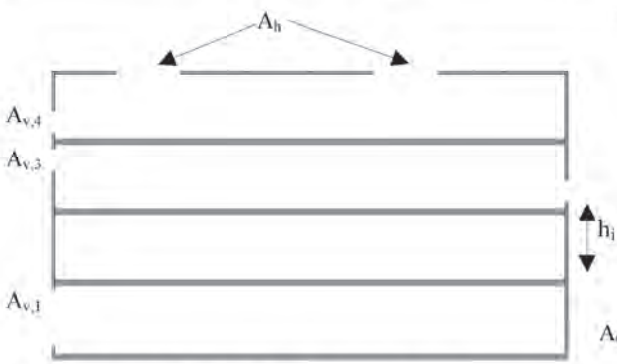


Bild 20. Schematische Darstellung der Geometrie des Industriebaus

Tabelle 12. Geometrie und Rechenwerte des Industriebaus

Ebene	A_i [m²]	Q_i [kWh]	q_i [kWh/m²]	$A_{v,i}$ [m²]	$A_{h,i}$ [m²]	h_i [m]	c
4	2.000	50.000	25	6	60	4	0,25
3	2.000	100.000	50	60		4	0,25
2	2.000	50.000	25			4	0,25
1	2.000	200.000	100	96		6	0,25
$\sum$	8.000	400.000		162		18	

sigen Brandbekämpfungsabschnitt mit 4 Geschossen/Ebenen.
Die den Ebenen i (i = 1 bis 4) zugeordneten Brandlasten Q_i, Ebenenflächen A_i sowie Öffnungen $A_{v,i}$ und $A_{h,i}$ und der Umrechnungsfaktor c sind in Tabelle 12 angegeben. Bei den Öffnungsflächen $A_{v,1}$ in der Ebene 1 handelt es sich um Türen und Tore; sie müssen von außen durch die Feuerwehr gewaltfrei geöffnet werden können. Weitere Bedingungen für Öffnungsflächen werden beim Ebenennachweis behandelt.

3.4.1 Globaler Nachweis

Zur Bestimmung von $t_ä$ als Eingangsgröße in die MIndBauRL für die Ermittlung zulässiger Flächen von Brandbekämpfungsabschnitten wird der globale Nachweis geführt. Für den globalen Nachweis werden die Ebenen „nebeneinandergelegt"; Brandlasten und Öffnungsflächen werden auf die Fläche A_B des BBA bezogen. Es wird angenommen, dass Feuer erfasst den gesamten BBA:
Bezugsfläche: $A_B = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 8.000$ m²
Brandlast: $Q_B = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 400$ MWh
Brandbelastung: $q_B = Q_B/A_B = 50$ kWh/m²

Wärmeabzugsfaktor w nach den Gln. (8) bis (14) der Norm:
$a_h = A_h/A_B = 60/A_B = 0{,}0075$
wegen $a_h > 0{,}005$ erfolgt beim globalen Nachweis keine Berücksichtigung von Gl. (10)
$a_v = (A_{v,1} + A_{v,3} + A_{v,4})/A_B = 162/A_B = 0{,}02$ (anzusetzender Mindestwert: $a_v = 0{,}025$)
$w_0 = 2{,}17$
$\alpha_w = (6{,}0/h_{i,m})^{0{,}3} = 1{,}09$
für $h_{i,m} = 4{,}5$ m (mittlere Höhe der Ebenen)
$w = \alpha_w \cdot w_0 = 2{,}37$
$t_ä = c \cdot w \cdot q_B \approx$ **30 min**

3.4.2 Öffnungsflächen für den Ebenennachweis

Ebene 4:
Für die Anrechnung der Öffnungsflächen A_h müssen die Flächen $A_{v,4} = 6$ m² als Zuluftöffnungen nach Abschnitt 8.1 der Norm in der unteren Raumhälfte von Ebene 4 angeordnet sein. Sie dürfen bei der Ermittlung des w-Faktors angerechnet werden. Da sie hier nicht (von außen) durch die Feuerwehr geöffnet werden können, müssen sie ständig offen sein oder automatisch geöffnet werden[2].
Aufgrund des Ergebnisses $t_{ä,4} < 15$ min (s. u.) müssen die Öffnungsflächen $A_{h,4}$ immer bzw. für $t_ä \leq 15$ min

2) Eine etwaige Anrechnung von Treppenraumtüren als Zuluftöffnungen müsste in der MIndBauRL geregelt werden.

mit der angesetzten Fläche zur Verfügung stehen (ständig offen oder als Rauch- und Wärmeabzugsgeräte nach DIN EN 12101-2 ausgeführt).

Ebene 3:
Von den $A_{v,3} = 60\ m^2$ müssen mindesten 30 m^2 in der oberen Raumhälfte angeordnet sein (Gl. (10) der Norm). Es müssen ferner mindestens 6 m^2 als Zuluftöffnungen in der unteren Raumhälfte von Ebene 3 angeordnet sein (Abschn. 8.1 der Norm), Ausführung wie bei Ebene 4. Alternativ bleibt $A_{v,3}$ unberücksichtigt (kein rechnerischer Wärmeabzug, dann erhöht sich $t_{\ddot{a},3}$ von 32,8 min auf 34,1 min.)

Ebene 2:
Auf Ebene 2 gibt es keinen Wärmeabzug; Zuluftöffnungen sind nicht notwendig.

Ebene 1:
Vorhanden sind 5 Tore, 4 m breit, 4,5 m hoch (und 3 Türen mit 2 m^2); anrechenbar sind nach Gl. (10) der Norm nur die 2-fachen Flächen in der oberen Raumhälfte, d. h. hier oberhalb von 3 m:

$$A_{v,1} = 2 \cdot A_{v1,ob} = 2 \cdot [5 \cdot (4{,}5\ m - 3{,}0\ m) \cdot 4{,}0\ m] = 60\ m^2$$

3.4.3 Ebenennachweis

Für die Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer wird für jede einzelne Ebene der Ebenennachweis geführt, wie in Tabelle 13 angegeben. Die Brandlasten und die Öffnungsflächen werden je Ebene auf die Ebenenfläche A_i bezogen; $\alpha_{w,i}$ nach Gl. (14) der Norm wird für $h = h_i$ bestimmt. Es wird angenommen, das Feuer erfasst nur jeweils eine Ebene.

Nach Abschnitt 4.1.2 der Norm darf die äquivalente Branddauer $t_{\ddot{a}}$ des globalen Nachweises nur dann durch den gemittelten $t_{\ddot{a}}$-Wert ($t_{\ddot{a},m}$) der Ebenen ersetzt werden, wenn $q_i \leq 60\ kWh/m^2$. Gemeint ist, dass ein Wert $t_{\ddot{a},m} < t_{\ddot{a}}$ nur unter der genannten Bedingung angesetzt werden darf. Da hier beide Werte ungefähr gleich sind, muss keine Unterscheidung vorgenommen werden.
Sicherheitsbeiwerte γ für die Berechnung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer sind nach Tabelle 2 der Norm für die Fläche A_B zu bestimmen – gilt für alle Beispiele; bei diesem Beispiel ist für die SK_b3 $\gamma = 1{,}43$.

3.5 BBA mit Deckenöffnungen ≤ 2 %

Es handelt sich um das gleiche Gebäude wie im vorigen Beispiel, allerdings gibt es Öffnungen in den Decken mit Öffnungsfläche ≤ 2 % der Grundfläche (s. Bild 21 und Tabelle 15). Bei den Deckenöffnungen handelt es sich um freie Öffnungen. Die Ebenen werden für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer bemessen (Tragfähigkeit) – das gilt auch für die weiteren Beispiele.
Für die Vergleichbarkeit mit dem vorigen Beispiel werden die Brandbelastungen auf den Ebenen gleich gelassen und die Verkleinerung der Bodenflächen A_i um $A_{b,i} = A_{h,i-1}$ vernachlässigt.

3.5.1 Globaler Nachweis

Für den globalen Nachweis werden die Ebenen „nebeneinandergelegt", wobei Öffnungen zwischen den Ebenen unberücksichtigt bleiben. Da die Verkleinerung der Bodenflächen um $A_{b,i}$ vernachlässigt wurde, ist der globale Nachweis identisch mit dem Nachweis des Beispiels in Abschnitt 3.2 ($t_{\ddot{a}} = 30$ min.).

Tabelle 13. Ergebnisse des Ebenennachweises

	A_i	$A_{v,i}$	$A_{h,i}$	$a_{v,i} = A_{v,i}/A_i \geq 0{,}025$	$a_{h,i} = A_{h,i}/A_i$	$w_{o,i}$ Gl. (12)	w_i Gl. (11)	$t_{\ddot{a},i} = q_i \cdot c \cdot w_i$
4	2.000	6	60	0,003 (0,025)	0,024	1,66	1,88	11,7
3	2.000	60	0	0,03		2,32	2,62	32,8
2	2.000	0	0	0 (0,025)		2,42	2,73	17,1
1	2.000	60	0	0,03		2,32	2,32	58,1

Gemittelter $t_{\ddot{a}}$-Wert der Ebenen: $t_{\ddot{a},m} = (\sum A_i \cdot t_{\ddot{a},i})/A_6 \approx 30$ min.

Tabelle 14. Anpassung von $t_{\ddot{a},i}$ gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm für $t_{\ddot{a},i} < t_{\ddot{a}}$

	$t_{\ddot{a},i}$	Vergleich mit $t_{\ddot{a}}$	Bewertung für Deckenöffnungen ≤ 2 %	$t_{\ddot{a},i}$ maßgebend
4	11,7	< 30	$t_{\ddot{a},4} < t_{\ddot{a}}$ ist zulässig, da es sich um die oberste Ebene handelt	11,7
3	32,8	> 30		32,8
2	17,1	< 30	Wegen $t_{\ddot{a},2} < t_{\ddot{a}}$ ist $t_{\ddot{a}}$ maßgebend	30,0
1	58,1	> 30		58,1

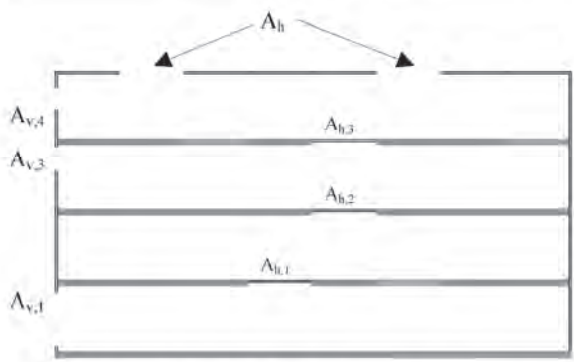


Bild 21. Schematische Darstellung der Geometrie des Industriebaus

Tabelle 15. Geometrie und Rechenwerte des Industriebaus

Ebene	A_i [m²]	Q_i [kWh]	q_i [kWh/m²]	$A_{v,i}$ [m²]	$A_{h,i}$ [m²]	h_i [m]	c_i [–]
4	2.000	42.500	25	6	60	4	0,25
3	2.000	95.000	50	60	40	4	0,25
2	2.000	45.000	25	–	40	4	0,25
1	2.000	200.000	100	96	40	6	0,25
$\sum$	7.400	382.500	–	162	–	18	–

3.5.2 Öffnungsflächen für den Ebenennachweis

Es gelten die Ausführungen des vorigen Beispiels. Darin waren die einzelnen Ebenen hinsichtlich Zuluft und Wärmeabzug voneinander unabhängig (keine Strömung zwischen den Ebenen). Gegenüber dem vorigen Beispiel kann unter bestimmten Voraussetzungen eine Strömung zwischen den Ebenen berücksichtigt werden; dann sind folgende Erleichterungen möglich:

- Verzicht auf definierte Zuluftöffnungen gemäß Abschnitt 8.1 der Norm in den Außenwänden von Ebene 4 und Ebene 3: Die Fläche der Bodenöffnungen beträgt $A_{b,i} > 6$ m². Eine Durchströmung der Ebene von den Bodenöffnungen zu den angerechneten Wärmeabzugsflächen der Ebene i muss sichergestellt sein. Für die Nachströmung an der Bodenöffnung müssen auf der untersten Ebene Öffnungsflächen $A_v \geq 6$ m² vorhanden sein, die von der Feuerwehr gewaltfrei geöffnet werden können, die aber auch bei Brandentwicklung in den oberen Ebenen geöffnet werden müssen. Das heißt, dass anstelle einer Zuluft je Ebene die Zuluftführung nur über die unterste Ebene erfolgt.
- In Ebene 3 und Ebene 1 muss Gl. (10) der Norm nicht beachtet werden: Die bezogene Fläche der Deckenöffnungen beträgt $a_{h,i} > 0{,}005$. Für ein Abströmen von der Deckenöffnung müssen dann in der obersten Ebene Öffnungsflächen mit mindestens $A_1 \cdot 0{,}005 = 10$ m² ständig offen sein oder als Rauch- und Wärmeabzugsgeräte nach DIN EN 12101-2 ausgeführt werden. Wird ein Wärmeabzug über die Ebenen berücksichtigt, müssen größere Flächen so ausgeführt sein (vgl. Abschn. 3.5.3).

Dann gilt für die Ebenen:

Ebene 4: Die Fläche $A_{v,4}$ wird – als Wärmeabzugsfläche – beibehalten.

Ebene 3: Es bestehen keine Anforderungen an die Lage der Öffnungsflächen $A_{v,3}$.

Ebene 2: Auf Ebene 2 gibt es keinen Wärmeabzug über die Außenwand.

Ebene 1: Die Tore und Türen mit Fläche $A_{v,1} = 96$ m² können voll angerechnet werden.

Werden in den oberen Ebenen keine Zuluftöffnungen in den Außenwänden angeordnet, muss sichergestellt sein, dass auch bei Brandentwicklung in den oberen Ebenen zumindest die Türen der Ebene 1 (6 m²) geöffnet werden.

3.5.3 Ebenennachweis – Wärmeabzug über die Ebenen vernachlässigt

Entsprechend Abschnitt 4.1.4 der Norm (2. Absatz) darf für den Ebenennachweis der Wärmeabzug zwischen den Ebenen vernachlässigt werden. Der Ebenennachweis ist für die Ebenen 2 bis 4 dann identisch mit

Tabelle 16. Anpassung von $t_{ä,i}$ gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm für $t_{ä,i} < t_ä$

	$t_{ä,i}$	Vergleich mit $t_ä$	Bewertung für Deckenöffnungen ≤ 2 % und < 20 m²	$t_{ä,i}$ maßgebend
4	11,7	< 30	$t_{ä,4} < t_ä$ ist zulässig, da es sich um die oberste Ebene handelt	11,7
3	32,8	> 30		32,8
2	17,1	< 30	Wegen $t_{ä,2} < t_ä$ ist $t_ä$ maßgebend	30,0
1	50,4	> 30		50,4

dem Nachweis bei dem Beispiel in Abschnitt 3.2, auch wenn eine Strömung zwischen den Ebenen gemäß Abschnitt 3.5.2 berücksichtigt wird, weil diese nur die Lage der Zuluftöffnungen betrifft. Für Ebene 1 ergibt die größere, anrechenbare Fläche $A_{v,1} = 96$ m² eine kleinere äquivalente Branddauer: $t_{ä,1} = 50{,}4$ min. Damit wird $t_{ä,m} < t_ä$ und darf wegen $q_1 > 60$ kWh/m² nicht anstelle von $t_ä$ gesetzt werden.

Die erforderliche Anpassung von $t_{ä,i}$ gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm (3. und 4. Absatz) ist davon abhängig, ob Öffnungsflächen zwischen den Ebenen größer oder kleiner als 20 m² sind. In diesem Beispiel sind die Öffnungen < 20 m².

Die Berücksichtigung der Strömung zwischen den Ebenen ergibt nur eine günstigere Bewertung für die Ebene 1. Daraus resultierende Anforderungen an die Öffnungsflächen in der Ebene 4 bestehen allein schon, wie im Beispiel in Abschnitt 3.2, aufgrund von $t_{ä,4} < 15$ min.

3.5.4 Ebenennachweis – mit Wärmeabzug (gleichmäßig verteilt) über die Ebenen

Die Verteilung der Öffnungsflächen in den Decken (ob gleichmäßig oder nicht gleichmäßig verteilt) spielt nur eine Rolle beim Ebenennachweis und auch dann nur, wenn ein Wärmeabzug über die Ebenen berücksichtigt wird.

Gemäß B.1 der Norm dürfen nur Flächen $A_{h,1} \leq A_{h,2} \leq A_{h,3} \leq A_{h(,4)}$ berücksichtigt werden, was hier für die Flächen 40 m²/40 m²/40 m²/60 m² erfüllt ist.

Wärmeabzugsflächen im Dach dürfen als Öffnungen nur dann angerechnet werden, wenn sie (zumindest mit Fläche der Deckenöffnungen) gemäß Anhang B.1 der Norm ständig offen sind oder als Rauch- und Wärmeabzugsgeräte nach DIN EN 12101-2 ausgeführt werden.

Bei diesem Beispiel sind die Öffnungsflächen im Sinne von Anhang B.2 der Norm gleichmäßig verteilt; als gleichmäßig verteilt gelten Öffnungen, wenn jeweils mindestens eine Öffnung auf 400 m² in übereinanderliegenden Bezugsflächen vorhanden ist. Das

Tabelle 17. Ergebnisse des Ebenennachweises

	A_i	$A_{v,i}$	$A_{h,i}$	$a_{v,i} = A_{v,i}/A_i \geq 0{,}025$	$a_{h,i} = A_{h,i}/A_i$	$w_{o,i}$ Gl. (12)	w_i Gl. (11)	$t_{ä,i} = c \cdot w_i \cdot q_i$
4	2.000	6	60	0,003 (0,025)	0,03	1,66	1,88	11,7
3	2.000	60	40	0,03	0.02	1,77	2,00	25,0
2	2.000	0	40	0 (0,025)	0,02	1,86	2,10	13,1
1	2.000	96	40	0,03	0,02	1,77	2,07[1)]	44,1

1) um 16 % vergrößert.

Tabelle 18. Anpassung von $t_{ä,i}$ gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm für $t_{ä,i} < t_ä$

	$t_{ä,i}$	Vergleich mit $t_ä$	Bewertung für Deckenöffnungen ≤ 2 % und < 20 m²	$t_{ä,i}$ maßgebend
4	11,7	< 30	$t_{ä,3} > t_{ä,4}$ ist nicht maßgebend; $t_{ä,4} < t_ä$ ist zulässig, da es sich um die oberste Ebene handelt	11,7
3	25,0	< 30	wegen $t_{ä,3} > t_ä$ ist $t_ä$ maßgebend	29,6
2	13,1	< 30	$t_{ä,1} > t_{ä,2}$ ist nicht maßgebend, wegen $t_{ä,2} > t_ä$ ist $t_ä$ maßgebend	30,0
1	44,1	> 30		44,1

sind hier bei 40 m² Öffnungsfläche 5 × 8 m² auf 5 × 400 m².
Die Brandlasten und die Öffnungsflächen werden je Ebene auf die Ebenenfläche A_i bezogen; $\alpha_{w,i}$ nach Gl. (14) der Norm wird für $h = h_i$ bestimmt.
Nach Anhang B.2 der Norm muss für die Ebene 1 der Wärmeabzugsfaktor vergrößert werden, da $h_2 < h_1$. Für die lineare Interpolation gilt: w_i (für $h_{i+1} < h_i$) = $w_i \cdot [1 + 0{,}25 \cdot (h_i - h_{i+1})/0{,}5\ h_i]$. Für $h_2 = 4$ m und $h_1 = 6$ m muss der w-Faktor um 16% vergrößert werden:
Gemittelter $t_{\bar{a}}$-Wert der Ebenen: $t_{\bar{a},m} = (\sum A_i \cdot t_{\bar{a},i})/A_B$ = 23,5 min.
$t_{\bar{a},m} < t_{\bar{a}}$ darf wegen $q_i > 60$ kWh/m² nicht anstelle von $t_{\bar{a}}$ gesetzt werden.
Man erhält für Ebene 1 bis 3 kleinere $t_{\bar{a}}$-Werte als bei (Annahme von) geschlossenen Decken. Gegenüber dem vorigen Beispiel müssen die Öffnungsflächen $A_{v,3}$ hier für $t_{\bar{a}} < 30$ min zur Verfügung stehen.

3.6 Deckenöffnungen > 20%, übereinanderliegend

Bei den Deckenöffnungen handelt es sich um freie Öffnungen ohne Brandbelastung. Sie sind gleich groß und übereinanderliegend angeordnet (s. Bild 22).
Zu den Öffnungsflächen je Ebene, vgl. voriges Beispiel.

3.6.1 Globaler Nachweis

Zur Bestimmung von $t_{\bar{a}}$ als Eingangsgröße in die MIndBauRL für die Ermittlung zulässiger Flächen von Brandbekämpfungsabschnitten:

Bezugsfläche: $A_B = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 6.800$ m²
Brandlast: $Q_B = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 360$ MWh
Brandbelastung: $q_B = Q_B/A_B = 52{,}9$ kWh/m²

Wärmeabzugsfaktor w:
$a_h = A_h/A_B = 400/A_B = 0{,}059$
$a_v = (A_{v,1} + A_{v,3} + A_{v,4})/A_B = 162/A_B = 0{,}024$ (anzusetzender Mindestwert: 0,025)
$w_o = 1{,}28$
$\alpha_w = (6{,}0/h)^{0{,}3} = 0{,}71$

für h = 18 m (Abstand Grundebene zum Dach[3])
$w = 0{,}91$
$t_{\bar{a}} = c \cdot w \cdot q_B = \mathbf{12}$ min

Anmerkung: In der Neufassung der DIN 18230-1 fehlen Angaben, für welche Höhe h der Faktor α_w für den globalen Nachweis zu bestimmen ist. Im Anhang D.13.4.3 der Fassung von 1998-05 war der Abstand der Grundebene zum Dach angegeben. Es besteht kein Anlass von dieser Vorgabe abzuweichen.

3) Deckenstärken außer Acht

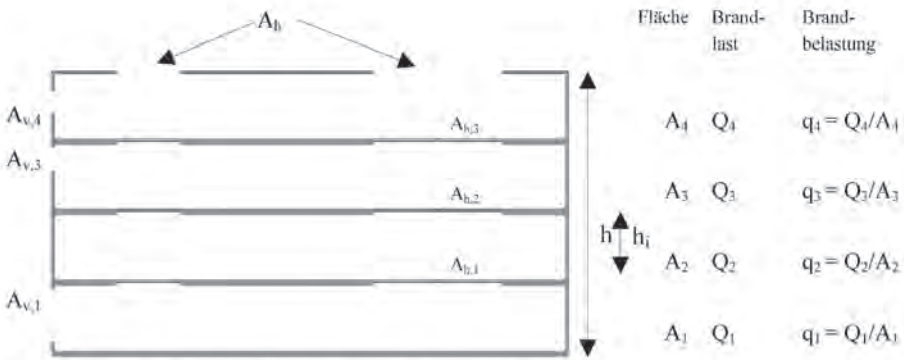


Bild 22. Schematische Darstellung der Geometrie des Industriebaus

Tabelle 19. Geometrie und Rechenwerte des Industriebaus

	A_i [m²]	Q_i [kWh]	q_i [kWh/m²]	$A_{v,i}$ [m²]	$A_{h,i}$ [m²]	h_i [m]	c [–]
4	1.600	40.000	25	6	400	4	0,25
3	1.600	80.000	50	60	400	4	0,25
2	1.600	40.000	25		400	4	0,25
1	2.000	200.000	100	60	400	6	0,25
$\sum$	6.800	360.000	–	126	–	18	–

Tabelle 20. Ergebnisse des Ebenennachweises

	A_i	$A_{v,i}$	$A_{h,i}$	$a_{v,i} = A_{v,i}/A_i \geq 0{,}025$	$a_{h,i} = A_{h,i}/A_i$	$w_{0,i} \geq 0{,}5$	h für $\alpha_{w,i}$	$\alpha_{w,i}$	$w_i \geq 0{,}5$	$t_{\bar{a},i} = c \cdot w_i \cdot q_i$
4	1.600	6	400	0,004 (0,025)	0,25	0,51	4	1,13	0,57	3,6
3	1.600	60	400	0,038	0.25	0,50	8	0,92	0,5	6,3
2	1.600	0	400	0 (0,025)	0,25	0,51	12	0,81	0,5	3,1
1	2.000	96	400	0,048	0,20	0,50	18	0,72	0,5	12,5

Tabelle 21. Anpassung von $t_{\bar{a},i}$ gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm

	$t_{\bar{a},i}$	Bewertung für Deckenöffnungen > 20m²	$t_{\bar{a},i}$ für > 20m²	Vergleich mit $t_{\bar{a}}$	$t_{\bar{a},i}$ maßgebend
4	3,6	$t_{\bar{a},3} > t_{\bar{a},4}$ aber $t_{\bar{a},3} < t_{\bar{a}}$	3,6	< 12	3,6
3	6,3	$t_{\bar{a},2} > t_{\bar{a},3}$ aber $t_{\bar{a},2} < t_{\bar{a}}$	6,3	< 12	12
2	3,1	wegen $t_{\bar{a},1} > t_{\bar{a},2}$ ist $t_{\bar{a},1}$ maßgebend	12,5	> 12	12,5
1	12,5		12,5	> 12	12,5

3.6.2 Ebenennachweis – Wärmeabzug über die Ebenen berücksichtigt

Wie bei den beiden vorigen Beispielen dürfen Wärmeabzugsflächen im Dach als Öffnungen nur dann angerechnet werden, wenn sie ständig offen sind oder als Rauch- und Wärmeabzugsgeräte nach DIN EN 12101-2 ausgeführt werden. Gemäß B.1 der Norm dürfen nur Flächen $A_{h,1} \leq A_{h,2} \leq A_{h,3} \leq A_{h(,4)}$ berücksichtigt werden, was für die gleichgroßen Flächen bei diesem Beispiel erfüllt ist. Die Brandlasten und die Öffnungsflächen werden je Ebene auf die Ebenenfläche A_i bezogen; $\alpha_{w,i}$ nach Gl. (14) der Norm wird aber gemäß Anhang B.3 der Norm für den Abstand der Ebene bis zum Dach bestimmt.

Eine Vergrößerung des Wärmeabzugsfaktors wie in Beispiel 2 und 3 wegen $h_2 < h_1$ ist bei dieser Anordnung von Öffnungsflächen nicht erforderlich.

Gemittelter $t_{\bar{a}}$-Wert der Ebenen: $t_{\bar{a},m} = (\sum A_i \cdot t_{\bar{a},i})/A_B = 6{,}7$ min

$t_{\bar{a},m} < t_{\bar{a}}$ darf wegen $q_1 > 60$ kWh/m² nicht anstelle von $t_{\bar{a}}$ gesetzt werden.

Öffnungsflächen zwischen den Ebenen > 20 m²

Gemäß Abschnitt 4.1.4 der Norm (Fall d)) ist für $t_{\bar{a},i} > t_{\bar{a}}$ bei Öffnungen > 20 m² für die darüber liegende Ebene die höhere äquivalente Branddauer maßgebend (Tabelle 21).

4 DIN 18230-4: Ermittlung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugs durch Brandsimulation

4.1 Einleitung

Die neue Norm (Entwurf Okt. 2010) gilt für alle Industriebauten gemäß der MIndBauRL und soll die allgemeine Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz gemäß Abschnitt 4.3 und Anhang 1 der Richtlinie erleichtern. Ziel ist es, die Eingangsparameter und Rechengrößen für Brandsimulationen in Industriegebäuden festzulegen, sodass die Anwendung im Rahmen eines vorgeschriebenen Verfahrens erfolgt und von behördlicher Seite aus gesehen nachvollziehbar und überprüfbar ist [4, 13]. Als Anwendungsbereiche kommen Nachweise infrage für

- komplexe Gebäudegeometrien,
- Teilflächen oder -abschnitte von sehr großen Brandbekämpfungsabschnitten,
- gesonderte Nachweise für lokale Brandwirkungen auf Bauteile,
- den Wärmeabzug bei Gebäuden mit mehreren Ebenen mit Öffnungen anstelle von Geschossdecken nach der MIndBauRL.

4.2 Anwendungsbereich der Norm

Die Brandsimulation kommt vor allen Dingen zum Einsatz, wenn die Grundvoraussetzung der DIN 18230-1, dass z. B. die Brandbelastung über die Grundfläche des Brandbekämpfungsabschnittes gemit-

telt werden darf, nur noch teilweise erfüllt bzw. nicht mehr gegeben ist. In diesen Fällen bleibt es nur übrig, die für eine Brandschutzbemessung größte Teilfläche mit der höchsten Brandbelastung und dem geringsten Wärmeabzug zu ermitteln und dafür die äquivalente Normbranddauer zu bestimmen. Dieser Teilbereich eines BBA wäre dann maßgebend für die Bemessung des gesamten Abschnittes, ein globaler Nachweis nach DIN 18230-1 ist dann nicht mehr erforderlich und entfällt.

4.3 Verfahren zur Berechnung der äquivalenten Normbranddauer

4.3.1 Berechnung von $t_ä$-Werten für Industriebauten durch Brandsimulation

Die Brandsimulation umfasst im Wesentlichen vier Einzelschritte und die in diesem Zusammenhang erforderlichen Festlegungen zum Zeitpunkt des Brandbeginns:

- Festlegung von Temperaturen und Drücken im Gebäude und der Umgebung für die Zeit $t = 0$,
- Beschreibung der Geometrie der Bauteile und die Art der verwendeten Baustoffe,
- Angaben über die Öffnungen für die Luftzufuhr und Wärme- und Rauchableitung und der zeitlichen Steuerung von Öffnungen,
- Festlegung des Brandszenariums auf der Basis vorhandener Brandbelastungen und Eigenschaften der brennbaren Stoffe.

Brandsimulationen haben somit zum Ziel, unter Beachtung der im Industriebau vorhandenen Brandlast, der Ventilation und der Wärmeübertragung an Bauteile und des zu erwartenden Brandes, die gemäß MIndBauRL erforderlichen $t_ä$-Werte zur Bestimmung des erforderlichen Feuerwiderstandes von Bauteilen und der maximal zulässigen Flächen für Brandbekämpfungsabschnitte zu ermitteln. Dazu ist es erforderlich, dass die Temperatureinwirkungen auf die Bauteile nach dem Äquivalenzverfahren anhand einer genormten Methode ermittelt werden.

Bei der Simulation in Industriebauten ist zu berücksichtigen, dass die Brandwirkungen und der Wärmeabzug je nach Brandablauf bereichsweise unterschiedlich sind, d. h. es sind auch lokale Effekte, z. B. aufgrund von unterschiedlich hohen Brandbelastungen, zu berechnen und zu bewerten. Bei der Anwendung von Mehrraum-Zonenmodellen und CFD-Modellen sind somit einzelne Zonen jeweils gesondert zu untersuchen, wenn örtlich höhere Brandbelastungen und/oder ungleichmäßig verteilte Wärmeabzüge in Teilbereichen zu lokal zu wesentlich höheren Brandwirkungen führen können, als es z. B. bei Annahme gleichmäßig verteilter Brandbelastungen und Wärmeabzügen der Fall ist. In diesen Fällen ist das lokale $t_ä$ relevant für den gesamten BA bzw. BBA.

4.3.2 Berechnung der äquivalenten Normbranddauer im Referenzbauteil

4.3.2.1 Beschreibung der Vorgehensweise

Die äquivalente Normbranddauer $t_ä$ entspricht der Zeit in Minuten bei der im Normbrand (Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve – ETK – nach DIN EN 1363-1) die gleiche Brandwirkung im genormten Bauteil durch die Brandraumtemperaturen erreicht wird wie durch die bei einem Brand in dem untersuchten BA bzw. BBA eines Industriebaus auftretende Temperaturentwicklung. Sie wurde in Abschnitt 2 bereits definiert.

Für das festgelegte Referenzbauteil aus Beton wurde für die Vergleichsberechnung nach DIN 18230-4 eine Tiefe von 35 mm festgelegt. In diesem Abstand von der heißen Betonoberfläche wird die Bestimmung der zeitabhängigen Referenztemperatur $T_{RBT,ETK}$ in dem Referenzbauteil und die Bestimmung der äquivalenten Branddauer durchgeführt. In Bild 23 ist das dazugehörige Ablaufschema angegeben (vgl. Abschn. 1.2, Bild 1). Die Gastemperaturen im Normbrand sind wie folgt anzusetzen:

$$T_{RBT,ETK}(t) = 20 + 345 \lg (8t + 1) \qquad (25)$$

Darin sind:

$T_{RBT,ETK}$ Gastemperatur im Normbrand gemäß DIN EN 1363-1 in °C

t Zeit in Minuten

Für die Temperatureinwirkung $T_{RBT,ETK}$ im Referenzbauteil beim Normbrand wurden die Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil in der definierten Tiefe von 35 mm berechnet. Mit den Eigenschaften und Übergangsbedingungen von Abschnitt 4.3.2.2 erhält man den in Tabelle 22 angegebenen Temperaturverlauf $T_{RBT,ETK}(t)$ im Referenzbauteil. Der Temperaturverlauf $T_{RBT,ETK}(t)$ ist somit Grundlage für alle $t_ä$-Bestimmungen.

$T_{RBT,ETK}(t)$ ist danach

- mit den Werten der Tabelle 22 anzusetzen,
- oder im Rahmen eines eigenen Berechnungsprogramms zu ermitteln, wobei die zulässigen Abweichungen von der Normtabelle mit ± 4 °C festgelegt sind.

Gemäß den Ausführungen in der Norm müssen alle Temperaturprogramme zur Berechnung von $t_ä$ verifiziert werden (vgl. Tabelle 22). Dazu sind die in Abschnitt 4.3.2.2 angegebenen Stoffwerte des Referenzbetons zu verwenden. Bei der Bestimmung der Heißgastemperaturen im Naturbrand durch Simulation sind die folgenden Einzelschritte einzuhalten:

Schritt 1: Festlegen des beurteilungsrelevanten Raums (Brandbekämpfungsabschnitt, Teilabschnitt, Ebene, usw.) nach Abschnitt 4.4.

Schritt 2: Festlegen der für die Brandsimulation zu berücksichtigenden Einflussgrößen und Randbedingungen gemäß Bild 23 und Abschnitt 4.4. Manuelle und automatische Maßnahmen zur Ermöglichung bzw. Ver-

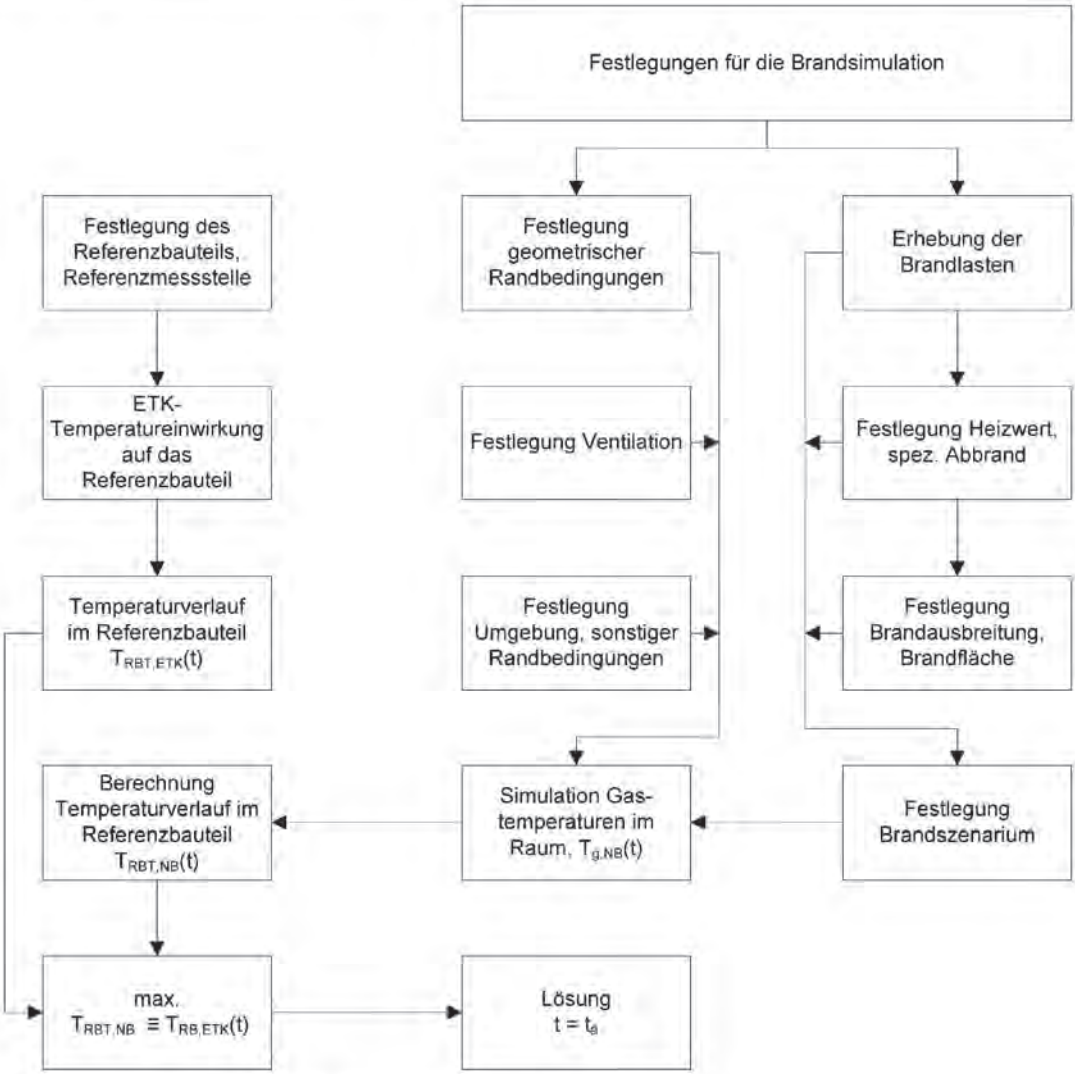


Bild 23. Ablaufschema zur Bestimmung der äquivalenten Branddauer durch Brandsimulation

besserung des Wärmeabzugs dürfen unter Berücksichtigung des zeitlichen Ablaufs dieser Maßnahmen in der Simulation berücksichtigt werden. Nicht berücksichtigt werden bei der Brandsimulation Maßnahmen zur Brandbekämpfung (z. B. manuelle und automatische Löschmaßnahmen).

Schritt 3: Berechnung der Heißgastemperaturen $T_{g,NB}(t)$ im betrachteten Raum durch Brandsimulation als zeitlich und räumlich veränderliche Temperaturverläufe und Auswahl der maßgebenden Temperaturen $T_{g,NB}(t)$ nach Abschnitt 4.4 in der Heißgasschicht – in der Regel die Heißgasschicht unter der Decke – für die Berechnung der Temperatureinwirkungen im Referenzbauteil.

Schritt 4: Auswertung der Simulationsergebnisse und Auswahl der maßgebenden „Messstelle" (M) – in der Regel die Heißgasschicht unter der Decke – siehe Abschnitt 4.4.

Der Temperaturverlauf an der maßgebenden Messstelle $T_{RBT,NB}(t, krit_M)$ ist als Temperatureinwirkung auf das Referenzbauteil anzusetzen. Gegebenenfalls müssen mehrere Messstellen betrachtet werden, um die maßgebende Messstelle zu erkennen (z. B. bei CFD-Simulationen). Die maßgebende Messstelle ist die mit der höchsten Maximaltemperatur im Referenzbauteil; sie muss sich nicht in jedem Fall unter der Decke in der Heißgasschicht befinden.

Tabelle 22. Temperaturen im Referenzbauteil unter ETK Belastung in 35 mm Tiefe zur Verifikation von Rechenprogrammen (Auszug)

Temperatur Betontiefe 35 mm $T_{RBT,ETK}$ °C	äquivalente Branddauer $t_{ä}$ min	Temperatur Betontiefe 35 mm $T_{RBT,ETK}$ °C	äquivalente Branddauer $t_{ä}$ min	Temperatur Betontiefe 35 mm $T_{RBT,ETK}$ °C	äquivalente Branddauer $t_{ä}$ min
20,0	0	410,6	65	613,8	130
28,8	5	431,7	70	625,2	135
55,3	10	451,5	75	636,3	140
82,2	15	470,2	80	647,1	145
113,8	20	487,8	85	657,4	150
159,9	25	504,4	90	667,5	155
202,9	30	520,2	95	677,3	160
241,7	35	535,4	100	686,8	165
276,7	40	549,8	105	696,0	170
308,3	45	563,7	110	705,0	175
337,1	50	576,9	115	713,7	180
363,6	55	589,7	120	–	–
388,0	60	601,9	125	–	–

Für die maßgebende Temperatur $T_{g,NB}(t, krit_M)$ im Referenzbauteil beim Naturbrand-Szenarium werden die Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil in einer Tiefe von 35 mm bestimmt. Mit den Eigenschaften und den Übergangsbedingungen nach Abschnitt 4.3.2.2 erhält man den gesuchten Temperaturverlauf $T_{RBT,NB}(t)$ im Referenzbauteil (s. Bild 23).

Aus dem Temperaturverlauf $T_{RBT,NB}(t)$ wird die maximale Temperatur im Referenzbauteil bestimmt: max. $T_{RBT,NB}$. Aus dem Vergleich mit den Referenztemperaturen beim Normbrand gemäß Tabelle 22 ergibt sich, wie in Bild 23 dargestellt, die äquivalente Branddauer $t_{ä}$:

$$\max. T_{RBT,NB} = T_{RBT,ETK}(t) \equiv \rightarrow t = t_{ä} \quad (26)$$

Für die unmittelbare Bestimmung von $t_{ä}$ kann die Inverse von $T_{RBT,ETK}$

$$t_{ä} = f(T_{RBT,ETK}) \quad (27)$$

angenähert werden.

Für die abschließende Festlegung von $t_{ä}$ müssen in der Regel mehrere Brandsimulationen durchgeführt werden, um die Empfindlichkeit von $t_{ä}$ gegenüber den Einflussgrößen und Randbedingungen zu prüfen und um die höchsten $t_{ä}$-Werte im BA bzw. BBA zu ermitteln. Die maßgeblichen Eingangswerte für die Simulation sind im Abschnitt 4.4 angegeben.

4.3.2.2 Referenzbauteil zur Bestimmung von $t_{ä}$

Berechnet wird die eindimensionale Temperaturausbreitung in einer 200 mm dicken Betonplatte in horizontaler Anordnung bei unterseitigem Brandangriff.

Der Beton ist vollständig hydratisiert, enthält nahezu thermisch inerte Gesteinskörnungen (Quarz) und hat eine Restfeuchte von 2 Gew.-%. Für diesen Beton müssen für eine Referenztemperatur von 20 °C die folgenden temperaturabhängigen Stoffkennwerte λ, ρ und c für den Referenzbeton angesetzt werden:

Wärmeleitung:

$T_c < 100\,°C$

$\lambda_c = 1{,}7455 + 0{,}1163\ F + 0{,}001628\ (T_c - 20)\ F \quad (28\,a)$

$100\,°C \le T_c < 700\,°C$

$\lambda_c = 1{,}7455 - 0{,}000872 \cdot (T_c - 100) \quad (28\,b)$

$T_c \ge 700\,°C$

$\lambda_c = 1{,}23 \quad (28\,c)$

Darin sind

λ_c Wärmeleitfähigkeit in W/mK

T_c Betontemperatur in °C

F Betonfeuchtigkeit in Gew.-%, Normwert 2 %

Rohdichte:

$20\,°C \le T_c < 100\,°C$

$\rho = \rho_{tr} + W \quad (29\,a)$

$100\,°C \le T_c < 700\,°C$

$\rho = \rho_{tr}\ (1{,}099057 - 1{,}4151 \cdot 10^{-4}\ T_c) \quad (29\,b)$

$700\,°C \le T_c < 1200\,°C$

$\rho = \rho_{tr} \quad (29\,c)$

Darin sind

ρ_{tr} Dichte des trockenen Betonmaterials, Normwert 2120 kg/m³

T_c Betontemperatur in °C
W Gesamtwassergehalt im Beton [kg/m³], Normwert 180 kg/m³

Wärmekapazität:

$20\,°C \le T_c < 100\,°C$
$c = 0{,}8346 + 0{,}0041\ T_c + 10^{-5}\ T_c^2$ (30 a)

$100\,°C \le T_c < 140\,°C$
$c = 2{,}542 - 0{,}0012\ T_c$ (30 b)

$140\,°C \le T_c < 200\,°C$
$c = 0{,}7976 + 6 \cdot 10^{-5}\ T_c + 7 \cdot 10^{-6} \cdot T_c^2$ (30 c)

$200\,°C \le T_c < 525\,°C$
$c = 1{,}0268 + 5 \cdot 10^{-5}\ T_c + 10^{-6} \cdot T_c^2$ (30 d)

$525\,°C \le T_c < 700\,°C$
$c = 1{,}796 - 0{,}0008\ T_c$ (30 e)

$700\,°C \le T_c \le 1\,200\,°C$
$c = 1{,}22$ (30 f)

Darin sind
T_c Betontemperatur in °C
c spezifische Wärmekapazität in kJ/kgK

Für die Berechnung der zeitabhängigen Temperaturverteilung im Referenzbauteil unter Normalbrandbeanspruchung (ETK) gelten die nachstehenden Abmessungen und Randbedingungen für den Wärmeübergang:
- Bauteildicke 200 mm,
- Referenztemperatur in 35 mm Bauteiltiefe,
- Ausgangstemperaturen $T_0 = 20\,°C$,
- Konvektion (heiße Seite) $\alpha_i = 25\ W/m^2K$,
- Konvektion (kalte Seite) $\alpha_a = 5\ W/m^2K$,
- Boltzmann Konstante $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ W/m^2K^4$,
- Einstrahlzahl $\varphi_{1,2} = 1$,
- Emissionszahl Beton $\varepsilon_b = 0{,}9$,
- Emissionszahl im Brandofen $\varepsilon_{f,g} = 0{,}7$.

Der Wärmestrom auf der Brandseite des Referenzbauteils berechnet sich aus:

$$\dot{q}_i = \alpha_i \cdot (T_g - T_{w,i}) + \varphi_{1,2} \cdot \varepsilon_{f,g} \cdot \varepsilon_b \cdot \sigma\left(T_g^4 - T_{w,i}^4\right) \quad (31)$$

Darin sind
$T_{w,i}$ Oberflächentemperatur des Referenzbauteils (heiße Seite)
T_g Brandgastemperatur, welche die Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion bestimmt

In die Gl. (31) ist T_g als Funktion der Zeit t in min gemäß der Normbrandkurve einzusetzen.

$$T_g = 20\,°C + 345 \log(8 \cdot t + 1) \quad (32)$$

Der Wärmestrom auf der kalten Seite berechnet sich aus:

$$\dot{q}_a = \alpha_a \cdot (T_{w,a} - T_0) + \varepsilon_b \cdot \sigma \cdot \left(T_{w,a}^4 - T_0^4\right) \quad (33)$$

Darin sind
T_0 Temperatur der Umgebung (Normwert 20 °C)
$T_{w,a}$ Temperatur der Bauteiloberfläche (kalte Seite)

Die unbekannten Bauteiltemperaturen $T_b(x,t)$ berechnen sich gemäß der Fourier-Gleichung aus:

$$\frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{\rho_b c_b} \cdot \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} \quad (34)$$

Darin sind
T_b Betontemperatur als Funktion der Zeit t und der Bauteiltiefe x
t Zeitdauer gemäß der Normbrandkurve
x Bauteiltiefe von der Brandseite gemessen
b Index für Beton

Die numerische Lösung der Gl. (34) ergibt für die Normbrand-Temperatur-Zeit-Kurve und einer Bauteiltiefe x von 3,5 cm in einer Betonplatte und temperaturabhängigen Betonkennwerten die Temperaturwerte nach Tabelle 22 in °C.
Abweichungen zwischen den $t_ä$-Werten nach Tabelle 22 und Referenzberechnungen der Anwender von max. ± 1 min Normbranddauer oder ± 4 °C bezogen auf die Referenztemperatur in 35 mm Betontiefe sind zulässig. Tabelle 22 dient auch als Referenztabelle zur Verifikation von Rechenprogrammen zur Bestimmung der äquivalenten Branddauer gemäß den o. a. Gleichungen, Randbedingungen und Stoffwerten.

4.3.3 Berechnung des Wärmeabzugsfaktors w aus der Brandsimulation

Der Wärmeabzugsfaktor w wird aus der berechneten äquivalenten Branddauer $t_ä$ wie folgt berechnet:

$$w = \frac{t_ä}{Q \cdot c} \quad (35)$$

Darin sind
$t_ä$ äquivalente Normbranddauer nach 4.3.2
Q Brandbelastung im betrachteten Brandbereich A_B in kWh/m²
c Umrechnungsfaktor c nach DIN 18230-1 in min m²/kWh

Die Bestimmung von c erfolgt nach DIN 18230-1:2010, Abschnitt 7.

4.4 Temperatur-Zeit-Verläufe für Brände in Industriebauten

4.4.1 Anforderungen an Brandsimulationsberechnungen

Die normativen Festlegungen für die Durchführung von Brandsimulationen zur Berechnung der repräsentativen Temperaturverläufe in Industriebauten bzw. in den darin vorhandenen Bereichen werden im Folgenden anhand der in 4.4.2 bis 4.4.5 beschriebenen Einzelschritte dargestellt und die zugehörigen physikalischen Gleichungen angegeben. Die Vorgehensweise ist abgestimmt auf die allgemeinen Vorgaben der MIndBauRL, Anhang 1, und die darin im Einzelnen vorgeschlagenen physikalischen Parameter und Kennwerte.

Industriebauten nach der MIndBauRL dürfen zukünftig auch nach DIN 18230-4 berechnet werden. Die Nachweise durch Brandsimulation dürfen insbesondere in den nachstehend genannten Fällen angewendet werden:

- Industriebauten mit Geometrien, welche von den Grundannahmen, d. h. weitgehend rechteckige/quadratische Grundrisse, deutlich abweichen, z. B. Industriebauten mit eingeschossigen Bereichen und angrenzenden Bereichen mit mehreren Ebenen, die in offener Verbindung stehen,
- Industriebauten mit Produktions- und Lagerstoffen, welche nach ihrem Abbrandverhalten nicht den Bewertungen durch die Faktoren m oder ψ gemäß DIN 18230-1 und -3 entsprechen,
- Teilabschnitts- und Teilflächennachweise in großen Industriebauten (> 2400 m²), welche nicht durch die vereinfachten Nachweise in DIN 18230-1 abgedeckt sind,
- Ermittlung des Wärmeabzugs in Gebäuden mit mehreren Ebenen, welche nicht durch die Nachweise für Gebäude mit mehreren Ebenen nach DIN 18230-1 abgedeckt sind,
- Industriebauten mit lokalen Maßnahmen für einen optimalen Wärmeabzug,
- Industriebauten mit Tragkonstruktionen und Brandwänden, welche lokalen Bränden mit hohen Brandbelastungen oder direkten Flammenbeanspruchungen unterliegen.

Die bei einem Bemessungsbrand für die Ermittlung von $t_ä$ maßgebenden Temperaturen werden durch die berechneten räumlichen mittleren Brandgastemperaturen in Bauteillängs- und -querrichtung entweder im Abstand von 100 mm von der betroffenen Bauteiloberfläche (in der Regel der Decke) oder der direkt an die Bauteiloberfläche anschließenden Gitterabstandes dargestellt.

Wesentliche physikalische Parameter und Stoffkennwerte für Baustoffe und Bauteile sind u. a. in [1] bis [5] sowie [14] bis [19] veröffentlicht. Bei der Brandsimulation sind nachstehend angegebene Kennwerte für den Wärmeübergang auf Bauteile zu verwenden:

Konvektion (heiße Seite):	α_i	= 25 W/m²K
Konvektion (kalte Seite):	α_a	= 5 W/m²K
Emissionszahl Brandrauch:	$\varepsilon_{f,g}$	= 0,7
Emissionszahl Flamme:	ε_{fl}	= 1,0
Emissionszahl Baustoffe:	ε	= 0,9
Einstrahlzahl:	φ	= 1,0

Abweichende Kennwerte für die konvektiven und radiativen Wärmeübergänge bei der Brandsimulation sind zulässig, wenn genauere Nachweise durchgeführt werden und diese in der Dokumentation der Norm gesondert dargestellt werden.

Brandsimulationsmodelle müssen die Strahlung von Brandgasen und Flammen berücksichtigen, weil der Strahlungsanteil bei Bränden bis zu 50 % der gesamten Brandleistung betragen kann (Regelfall 30 %) und somit maßgebend die Brandraumtemperaturen beeinflusst [16–18].

4.4.2 Brandsimulation mit Zonenmodellen – Geometriemodellierung

Die Modellierung von Industriebauten kann bei ungleichmäßig verteilten Brandbelastungen und/oder Wärmeabzügen sowie bei großen BA oder BBA auf der Basis definierter Teilflächen erfolgen, welche bei der Simulation durch vorgegebene Brandbereiche (geometrisch ausgebildete oder virtuell festgelegte Raumbereiche) dargestellt werden. Dabei umfasst die Summe aller Brandbereiche den gesamten Brandabschnitt oder Brandbekämpfungsabschnitt hinsichtlich der Grundflächen, Decken- und Ebenenabstände sowie die geometrischen Maße aller Öffnungen nach DIN 18230-1:2010, Abschnitt 8.2.

Kubische Räume sind gemäß den geometrischen Abmessungen nachzubilden. Nicht kubische Räume und deren Öffnungen werden in äquivalenter Geometrie nachgebildet. Die kubische Abbildung muss oberflächenäquivalent sein und die Lage der Ventilationsöffnungen und Decken sind höhengleich zur Realität abzubilden.

Bei Industriebauten mit Flächen $A_{BA} < 5\,000$ m² bzw. $A_{BBA} \geq 5\,000$ m² sollten jeweils zwei oder mehr Bereiche nach den Gleichungen:

$$A_B = \frac{A_{BA}}{n} \quad \text{mit } A_B < 5\,000 \text{ m}^2 \text{ und } n \geq 2 \tag{36}$$

oder

$$A_B = \frac{A_{BBA}}{n} \quad \text{mit } A_B \geq 5\,000 \text{ m}^2 \text{ und } n > 2 \tag{37}$$

mittels Brandsimulation untersucht werden, wobei die geometrischen Gegebenheiten und vorliegenden Nutzungsbereiche im Brandbekämpfungsabschnitt zu berücksichtigen sind. Der jeweils größte $t_ä$-Wert ist maßgebend für die brandschutztechnische Bemessung der Bauteile.

Die Grundflächen der einzelnen Brandbereiche A_B sollten bei ungleichmäßig verteilter Brandbelastung etwa die gleichen Abmessungen haben, wenn sie aufgrund virtueller Unterteilungen und nicht nach den geometrischen Gegebenheiten gebildet werden. Bei unterschiedlichen Nutzungen, Wärmeabzügen und Brandbelastungen sind bei Industriebauten die jeweils unterschiedlichen Bereiche als Brandbereiche A_B abzubilden und die zugehörigen $t_ä$-Werte zu berechnen. Die größten berechneten $t_ä$-Werte sind maßgebend für die brandschutztechnische Bemessung aller Bauteile in den untersuchten Bereichen.

4.4.3 Brandsimulationen mit CFD-Modellen – Geometriemodellierung

Die Modellierung erfolgt auf der Basis einer räumlichen Diskretisierung, welche in kartesische Koordinaten oder als freie Volumengeometrien abgebildet werden und in ihrer Gesamtheit das Gebäude im Maßstab 1:1 abbilden. Bei der Verwendung kartesischer Volumengeometrien dürfen die Schrägen von Wänden oder Decken in Stufen durch Anpassung mit entsprechend klei-

nen Zellgrößen angenähert werden. Ebenso ist es zulässig, volumen- und höhengleiche Nachbildungen der Geometrien zu verwenden. Die Gitterabstände im Bereich von Öffnungen sind so festzulegen, dass die zu erwartenden Strömungen (Strömungsverluste) richtig abgebildet werden.

4.4.4 Randbedingungen für die Ventilation

4.4.4.1 Allgemeine Anforderungen bei Zonen- und CFD-Modellen

Die Ventilation ist entsprechend der nutzungsspezifischen, anlagentechnischen und geometrischen Bedingungen zu modellieren. Alle Öffnungen, welche der Zuführung von Luft oder Abfuhr von Wärme und Rauch dienen, dürfen berücksichtigt werden.
Die Ventilation ist in der Simulation entsprechend den tatsächlich vorhandenen Zeiten für den Öffnungsbeginn, -ablauf und das Öffnungsende zu berücksichtigen. Bei einer Auslösung über eine flächendeckende Brandmeldeanlage darf der Beginn der Wirkungsweise auf 1 min festgelegt werden. Für das manuelle Öffnen der Ventilation durch eine Werkfeuerwehr darf der Beginn des Öffnungsvorgangs auf ≥ 5 min festgelegt werden. Die Dauer der Öffnungsvorgänge darf mit 1 min (automatisches Öffnen) und 15 min (Werkfeuerwehr) ohne gesonderten Nachweis angesetzt werden.
Die Berechnungen sind mit folgenden Umgebungsbedingungen durchzuführen:

Temperatur: 20 °C
Druck: $1{,}0133 \cdot 10^5$ Pa

Eine maßstäbliche Verkleinerung und Modellierung der Geometrie sowie weiterer brandschutztechnischer Eingangsgrößen ist im Simulationsmodell nicht zulässig.

4.4.4.2 Besondere Randbedingungen bei der Brandsimulation mit Zonen-Modellen

Anrechenbar sind alle Öffnungen, welche mit der Simulationsumgebung verbunden sind. Bei der Simulation sind vertikale und horizontale Öffnungen, soweit gesonderte Nachweise nicht vorliegen, mit einem Kontraktionsbeiwert von 0,7 zu bewerten. Sehr große Öffnungen (> 4 m²) und solche mit mittleren Strömungsgeschwindigkeiten ≤ 1 m/s dürfen mit 0,95, Öffnungslamellen und schräggestellte Fensterklappen oder Luken dürfen mit einem Kontraktionsbeiwert von 0,5 bewertet werden.
Horizontale Öffnungen in Decken von Gebäuden mit mehreren Ebenen sind zulässig und entsprechend ihrer geometrischen Anordnung zu berücksichtigen. Sie sind bis 4 m² Querschnitt mit einem Kontraktionsbeiwert von 0,7 zu bewerten. Für Öffnungen > 4 m² und einem Seitenverhältnis > 1:2 und solchen mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ≤ 1 m/s darf mit einem Kontraktionsbeiwert von 0,95 gerechnet werden.

4.4.4.3 Randbedingungen bei der Brandsimulation mit CFD-Modellen

Bei der Simulation der Durchströmung der Öffnungen in Außenbauteilen ist die Umgebung zu berücksichtigen, d. h. die Diskretisierung des Raumes an und um die Öffnungen hat so zu erfolgen, dass die maßgebenden physikalischen Phänomene an der Öffnung realitätsnah wiedergegeben werden. Empfohlen wird, dass die Gitterkoordinaten der Gitterzellen oder Volumenelemente nicht am Gebäude, sondern in der Umgebung enden. Der Abstand der außen liegenden Gitter von Wänden oder Dächern muss bei vertikalen Öffnungen mindestens den 1,5-fachen Wert der Öffnungsbreite und bei horizontalen Öffnungen mindestens den 2,5-fachen Wert der kleinsten Abmessung der Öffnung betragen.
Das Gitterraster in Öffnungen und davor/dahinter soll den Wert von 6 Gitterabständen in der kleinsten Öffnungslänge bzw. einen Wert von 20 cm nicht überschreiten, um die Kontraktion der Strömungen in der Simulation abbilden zu können.

4.4.5 Bedingungen für Brandszenarien bei der Brandsimulation in Industriebauten

4.4.5.1 Anforderungen bei der Modellierung von Brandszenarien

Allgemeine Anforderungen
Unbeschadet der Art der verwendeten Rechenmodelle zur Berechnung der Temperatur-Zeit-Kurve bei der Simulation von Bränden in Industriegebäuden sind die folgenden Anforderungen einzuhalten. Zur Festlegung des Brandszenariums sind die gesamte Brandlast (Q_{ges}) im BA bzw. BBA, der Brandentstehungsort, der Brandablauf, die maximale Brandfläche und die brandspezifischen Kennwerte (z. B. Heizwert, spezifische Abbrandrate, Verbrennungseffektivität, Verbrennungsgleichung) für jeden Einzelfall zu ermitteln und gemäß den folgenden Angaben festzulegen.

Brandlastmenge
Die Brandbelastungen sind als 90%-Fraktile der vorliegenden Nutzung für jeden Einzelfall zu ermitteln und bei der Simulation zu verwenden. Das bedeutet auch, dass über den Nutzungszeitraum die Brandbelastungen nur im Rahmen von 10 % der Nutzungsdauer den 90%-Wert überschreiten dürfen.

Zündort
Der Ort der Brandentstehung ist in den Mittelpunkt des betrachteten Brandbereiches zu legen, sofern nicht entsprechend den örtlichen Gegebenheiten eine wahrscheinliche Brandentstehung an den Rändern der Brandbereiche zu erwarten ist.

Brandfläche und Brandausbreitung
Die mit Brandlasten belegten Brandflächen A_B sind bei der Simulation jeweils einzeln oder in der Summe (z. B. BA, BBA) als Bemessungsbrandfläche zu definieren.

Tabelle 23. Ausbreitungsgeschwindigkeiten für horizontale Brandentwicklung

	Horizontale Ausbreitung		
	Ausbreitung mittel	Ausbreitung schnell	Ausbreitung sehr schnell
Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min	0,25	0,45	1,0
Zeitdauer t_V bis zum Erreichen einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von sehr schnell (1 m/min) in min	15	10	~ 0

Die Brandausbreitung wird durch die Vorgabe der Brandausbreitungsgeschwindigkeit oder durch Anwendung physikalischer Brandausbreitungsmodelle bestimmt. Die in den Ausbreitungsmodellen zugrunde gelegten physikalischen Kennwerte der verwendeten brennbaren Stoffe sind in der Dokumentation gesondert anzugeben und zu begründen.

Die Fläche für die Zündquelle darf mit ≤ 100 cm² angesetzt bzw. vernachlässigt werden. Die Brandausbreitung soll zweidimensional erfolgen, wobei als Regelfall für die horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit 1 m/min anzunehmen ist. Für die Brandausbreitung von Produktions- und Lagerstoffen, welche bei hinreichender Luftzufuhr nachweislich unter der Brandausbreitung von 1 m/min liegen, dürfen bei der Brandsimulation bis zum Zeitpunkt t_V nach Tabelle 23 geringere Ausbreitungsgeschwindigkeiten eingesetzt werden, bis eine Fläche von 75 m² erreicht ist oder die Zeiten t_V nach Tabelle 23 überschritten werden. Danach ist eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1 m/min zugrunde zu legen, wenn kein genauerer Nachweis über die Brandausbreitung erfolgt (z. B. Literaturkennwerte, Versuchsergebnisse).

Bei der Verwendung von Brandleistungskurven in der Brandsimulation ist nachzuweisen, dass die Brandausbreitungsgeschwindigkeit die in Tabelle 23 angegebenen Werte nicht unterschreitet. Vertikale Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind bei größeren Lagerhöhen größer als die horizontale Ausbreitung und im Regelfall mit einem Faktor 2,5 bezogen auf die horizontale Ausbreitung ab einer Lagerhöhe ab 4,5 m anzunehmen.

Heizwert und Verbrennungseffektivität

Die in der Brandsimulation anzunehmenden Heizwerte und Verbrennungseffektivitäten sind der DIN 18230-3 sowie einschlägigen Standardwerken [1–5, 8, 9] zu entnehmen. Soweit der Feuchtigkeitsgehalt der Produktions- und Lagerstoffe bekannt sind, dürfen die unteren Heizwerte gemäß DIN 18230-3 nach Gl. (38) abgemindert werden. Der Feuchtegehalt von brennbaren Produktions- und Lagerstoffen darf wie folgt berücksichtigt werden:

Tabelle 24. Verbrennungseffektivität von Produktions-, Bau- und Lagerstoffen nach DIN 18230-4

Phase	Mittlere Verbrennungseffektivität ζ
Gasförmig	1,0
Flüssig	0,9
Fest	0,8

$$H_u = H_{u,Norm}\,(1 - 0{,}01\,u) - 0{,}00649\,u \tag{38}$$

Darin sind

- u Feuchtegehalt der Stoffe in Gewichtsprozent bezogen auf das Trockengewicht (105 °C Trocknung)
- $H_{u,Norm}$ unterer Heizwert nach DIN EN ISO 1716

Die Heizwerte für häufig vorkommende Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase können der DIN 18230-3: 2002-08 oder der Fachliteratur [1, 2, 5] entnommen werden. Die Verbrennungseffektivität ζ ist gemäß DIN 18230-4 nach Tabelle 24 nur grob festgelegt. Für genauere Nachweise können versuchstechnisch nachgewiesene Werte verwendet werden.

Die Verbrennungseffektivität wird bei der Brandsimulation durch Multiplikation mit der gesamten Brandlast sowie durch Multiplikation mit dem Heizwert bei der Berechnung der spezifischen Abbrandraten und Brandleistungen wie folgt berücksichtigt:

$$Q_R = \zeta \cdot Q_{ges} \tag{39}$$

$$\dot{Q} = \dot{r} \cdot H_u \cdot \zeta \cdot A_B \tag{40}$$

Die Abbrandfaktoren m nach DIN 18230-3 dürfen bei der Brandsimulation nicht verwendet werden. Soweit aus Brandversuchen gemessene ζ-Werte für Produktions- und Lagerstoffe bekannt und dokumentiert sind, dürfen diese verwendet werden. Der kleinste Wert von ζ ist in der Tabelle 24 mit 0,8 festgelegt, kleinere Werte müssen experimentell für Vollbrände mit hinreichender Sauerstoffzufuhr nachgewiesen werden.

Spezifische Abbrandrate und Brandleistung

Die spezifische Abbrandrate auf der Oberfläche von Feststoffen und Flüssigkeiten wird theoretisch wie folgt bestimmt:

$$\dot{r}_{spez} = \frac{\dot{q}_F - \dot{q}_L}{L_V} \tag{41}$$

Darin sind

- $\dot{r}_{spez}$ spezifische Abbrandrate in kg/m²h
- $\dot{q}_F$ Wärmezufuhr auf die brennende Oberfläche aus der Umgebung (Flammenstrahlung, Konvektion) in kW/m²
- $\dot{q}_L$ Wärmeverluste an der brennenden Oberfläche (Rückstrahlung, Wärmeableitung) in kW/m²
- L_V Wärmeenergie zur Produktion brennbarer Pyrolysegase oder Dämpfe in kWh/kg

Werte von $\dot{r}_{spez}$ und L_v sind in vielen Standardwerken tabelliert und können zur Berechnung der Brandleistung verwendet werden [1, 2, 4, 5, 8, 9]. Da bei Brandsimulationen $\dot{q}_F$ und $\dot{q}_L$ in der Regel nicht genau bestimmbar sind, ist die nachstehende Vorgehensweise zulässig. Aus Gl. (41) erhält man für praktische Fälle mit hinreichender Genauigkeit die spezifische Brandleistung:

$$\dot{q}_{spez} = \dot{r}_{spez} \cdot H_u \cdot \zeta \tag{42}$$

Darin sind

$\dot{q}_{spez}$ spezifische Brandleistung bezogen auf die Oberfläche in kW/m²
ζ Verbrennungseffektivität [-]
H_u unterer Heizwert in kWh/kg

Für den Abbrand von Objekten mit mehreren brennbaren Oberflächen (z. B. Stapel von Holzpaletten) darf der spezifische Abbrand des Objekts näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$\dot{r}_{spez,Objekt} = \dot{r}_{spez} \cdot \frac{O_{fl}}{A_{B,Objekt}} \tag{43}$$

Darin sind

O_{fl} die bewertete brennende Oberfläche des Gegenstandes im m²
Für eine Lagerhöhe ≤ 3 m gilt:
$O_{fl} = A_{B,Objekt}$,
für eine Lagerhöhe > 3 m gilt:
$O_{fl} = [(h - 3\,m)\,0{,}5 + 1]\,A_{B,Objekt}$
$A_{B,Objekt}$ dem Objekt zugeordnete Brandfläche
h Lagerhöhe in m (Lagerhöhe, maximal 9 m entsprechend MIndRL)

Soweit keine genaueren Nachweise geführt werden, ist $A_{B,Objekt}$ auf die Referenzhöhe in Höhe von einem Drittel der Lagerhöhe festzulegen. Für einen definierten Brandbereich A_B bzw. eine Brandfläche, welche vollständig vom Brand erfasst ist, errechnet sich daraus die Brandleistung zu

$$\dot{Q} = \dot{r}_{spez,Objekt} \cdot H_u \cdot \zeta \cdot A_B \tag{44}$$

Für ein Objekt, das in einem Zeitraum von t_0 bis t_1 abbrennt, gilt Gl. (45).

$$\dot{Q}_{t_0-t_1} = \dot{r}_{spez,Objekt,t_0-t_1} \cdot H_{u,t_0-t_1} \cdot \zeta_{B,Objekt,t_0-t_1} \cdot A_{B,Objekt,t_0-t_1} \tag{45}$$

Für mehrere Objekte der Anzahl n, bei denen sich Entzündungs- und Abbrandzeiten überlappen, ist Gl. (46) anzuwenden.

$$\dot{Q}_{gesamt}(t) = \sum_{i=1}^{n} \dot{Q}_{t_i-t_{i+1}} \tag{46}$$

Bei der Vorgabe einer zeitabhängigen Brandleistung (Heat Release Rate) als Brandszenarium muss im Zuge der Simulation im Simulationsmodell rechnerisch geprüft werden, ob die vorgegebene Pyrolyserate bzw. Brandleistung dem vorliegenden Brandregime entspricht und physikalisch möglich ist. Diesbezüglich sind die Abbrandraten entsprechend dem Brandregime während der Simulation im Modell in jedem Zeitschritt automatisch so zu korrigieren, sodass sich ein brandlastgesteuerter Brand einstellt (s. Gl. 48).

Wärmefreisetzung im betrachteten Brandbereich

Die gesamte potenzielle Energiemenge aus den Brandlasten im betrachteten Bereich (in der Regel BA, BBA, Teilfläche, lokale Teilfläche oder Teilabschnitte) ist zu berücksichtigen. Es ist zu prüfen, ob das Flächenintegral unter der Brandleistungskurve vom Zeitpunkt der Entzündung t = 0 bis zum Brandende $t_{B,E}$ der gesamten Brandlast auf der Brandfläche unter Berücksichtigung der Verbrennungseffektivität nach Tabelle 24 entspricht, d. h. es gilt:

$$Q_R = \int_{t=0}^{t_{B,E}} \dot{Q}(t)dt \tag{47}$$

Darin sind

Q_R rechnerische Brandlast auf der betrachteten Brandfläche in kWh
$\dot{Q}(t)$ zeitabhängige Brandleistung auf der Brandfläche im betrachteten Bereich in kW
$t_{B,E}$ Zeitpunkt für Brandende in h

Beispiel: Für eine konstante Brandleistung $\dot{Q}(t)$= 50 000 kW mit der Verbrennungseffektivität ζ = 0,8 und einer Branddauer $t_{B,E}$ = 2 h ergibt sich aus Gl. (47) eine rechnerische Brandlast von 80 000 kWh.

4.4.5.2 Brandregime

Als Brandregime werden brandlastgesteuerte und ventilationsgesteuerte Brände betrachtet. In den Simulationen dürfen brandlastgesteuerte und ventilationsgesteuerte Brände berücksichtigt werden, d. h. unabhängig von der Höhe der tatsächlichen stoffabhängigen maximalen spezifischen Brandleistungen bzw. den spezifischen Abbrandraten der vorhandenen Stoffe oder des Verlaufs von bei der Simulation vorgegebenen Brandleistungskurven müssen die spezifischen Brandleistungen bzw. Abbrandraten so festgelegt werden, dass sich physikalisch mögliche Brandabläufe im Brandbereich ergeben.

Im Hinblick auf das unterschiedliche Verhalten von gasförmigen, flüssigen und festen brennbaren Stoffen ist es zweckmäßig und auch international üblich, bei Bränden dann auch eine unvollständige Verbrennung zugrunde zu legen, wenn die stöchiometrisch erforderlichen Luftmengen nicht mehr eingehalten werden können. In der Simulation muss daher zu jedem Zeitpunkt geprüft werden, dass für die Verbrennung eine hinreichende Luftmenge zur Verfügung steht. Der Grenzfall der stöchiometrischen Verbrennung ist im vorliegenden Fall durch die folgenden Bedingungen gegeben:

$$\frac{\dot{r} \cdot r_{stöch}}{\dot{m}_l} = \Phi < 1{,}0 \text{ brandlastgesteuerter Brand}$$

und $\Phi \geq 1{,}0$ ventilationsgesteuerter Brand (48)

Darin sind

$r_{stöch}$ stöchiometrischer Luftbedarf in kg Luft/kg Brennstoff

$\dot{m}_l$ (Zu)Luftmassenstrom in kg/h

Die maximale Höhe der spezifischen Brandleistung ergibt sich aus den Stoffdaten der Produktion- und Lagerstoffe (DIN 18230-3, [1, 2, 5, 7–9] und den aus der Brandsimulation resultierenden Ventilationsdaten. Nur bei hinreichender Luftzufuhr ($\Phi < 1{,}0$ und $\zeta = 1{,}0$) kann eine spezifische Brandleistung nach Gl. (49) erreicht werden.

$$\dot{Q}_{spez}(t) = \dot{r} \cdot H_u \tag{49}$$

Solange der Brand ventilationsgesteuert ist ($\Phi \geq 1{,}0$), ist für die Brandleistung der Ausdruck H_u/r maßgebend. Dieser Wert ist für viele Brennstoffe annähernd konstant, d. h. die pro kg Luft umgesetzte Energie ist nahezu unabhängig von der Vollständigkeit der Verbrennung und der Art des Brennstoffs.

Für die Berechnung des stöchiometrischen Luftbedarfes r gilt die Beziehung

$$r = c_{stöch} \cdot H_u \tag{50}$$

Darin ist

$c_{stöch}$ stöchiometrischer Luftbedarf pro kWh Verbrennungsenergie
(Normwert: $c_{stöch} = 1{,}13$ kg L/kWh)

Die spezifische Abbrandrate $\dot{r}$ wird experimentell in der Regel bei Versuchen mit Luftüberschuss, d. h. für brandlastgesteuerte Brände ermittelt. Bei Bränden in der Praxis ist dieser Fall dann gegeben, wenn eine hinreichende Luftzufuhr und entsprechende Wärmeabzüge zur Verfügung stehen. Bei der Brandsimulation ist für das $\dot{r}$ das 90%-Quantil der gemessenen mittleren Abbrandrate einzusetzen, d. h. die Werte liegen im oberen Bereich der theoretisch möglichen Raten. Die erforderliche Luftmenge für brandlastgesteuerte Brandszenarien sollte in der Simulation daher so kontrolliert werden, dass im Bereich des Brandvolumens ≤ 21 Vol.-% Sauerstoff der zugeführten Luftmenge verbrennen. Dieser Wert ist über den Simulationszeitraum zu kontrollieren, d. h. während der Simulation ist der Sauerstoffanteil in den Rauchgasen zu berechnen und die Brandleistung ist entsprechend dem Brandregime festzulegen.

Die spezifische Abbrandrate für einen ventilationsgesteuerten Brand errechnet sich unter Beachtung von Gl. (48) zu:

$$\dot{r}_v = \frac{\dot{m}_l}{1{,}13 \cdot H_u} \tag{51}$$

Die zugehörige Abbrandrate ist nach jedem Zeitschritt zu berechnen und in Gl. (49) einzusetzen, woraus sich eine reduzierte spezifische Brandleistung errechnet. Für den Fall $\zeta < 1$ gilt:

$$\dot{Q}_v = \dot{r}_v \cdot \zeta \cdot H_u \quad \text{ventilationsgesteuerter Brand} \tag{52}$$

Generell gilt:

$$\dot{Q}_{spez}(\dot{r}, t) \geq \dot{Q}(\dot{r}_v, t) \quad \text{brandlastgesteuerter Brand} \tag{53}$$

Bei der Simulation von Bränden mit vorgegebenen Brandleistungskurven muss das verwendete Rechenprogramm selbstständig die reduzierte Brandleistung $\dot{r}_v$ nach Gl. (52) und die Eingabewerte automatisch korrigieren. Simulationsprogramme ohne diese Möglichkeit sind im Rahmen dieser Norm nicht anwendbar.

Tabelle 25. Luftbedarf und Heizwerte von Brennstoffen, heizwertbezogener Luftbedarf verschiedener Brennstoffe (nach [1, 5, 7])

Brennstoff	Stöchiometrischer Luftbedarf r kg L/kg Br	Heizwert kWh/kg	H_u/r kWh/kg Luft
Holz	5,161	4,8	0,93
Papier	4,176	3,8	0,91
Aktivkohle	11,179	9,1	0,814
PVC-Kabel	6,039	5,0	0,828
Polyethylen (Granulat)	14,742	12,0	0,814
Polystyrol	13,038	10,9	0,836
Benzin	13,462	11,9	0,884
Heizöl	13,029	11,7	0,898
Methanol	6,788	5,6	0,825
Heptan	14,139	12,4	0,877

4.4.5.3 Arten von Brandszenarien

Verbrennungsrechnungen sind unter Berücksichtigung eines definierten Brennstoffs oder Gemisches und der vorhandenen Luftmengen erforderlich. Bei der Simulation dürfen die folgenden Arten von Brandszenarien verwendet werden:

- Vorgabe einer zeitabhängigen Brandleistungsfunktion oder Abbrandrate (Brandleistungskurven, Design Fire), unter Berücksichtigung eines definierten Brennstoffs.
- Ausbreitungsmodell nach Abschnitt 4.4.5.4 unter Berücksichtigung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit, des Heizwertes, der Verbrennungseffektivität, der spezifischen Brandleistung und unter Berücksichtigung eines definierten Brennstoffs.
- Die freie Berechnung der Abbrandraten mittels validierter Submodelle aus der Verbrennungslehre anhand der vorhandenen Stoffe und einer vollständigen chemischen und reaktionskinetischen Beschreibung des Verbrennungsmodells ist zulässig.

Nicht zulässig ist die Verwendung von:

- Volumenquellen, die in einem bestimmten Volumenbereich pro Zeiteinheit so viel Energie freisetzen, dass die durch den Bemessungsbrand vorgege-

bene (konvektive) Brandleistung $\dot{Q}_c(t)$ (gesamte Wärmefreisetzung $\dot{Q}(t)$ abzüglich Strahlungsanteil) exakt erreicht wird.
- Thermikstrahlen: Im Bereich der Brandquelle wird ein heißes Gas mit einem bestimmten Volumen- bzw. Massenstrom zugeführt.

Die zur Entwicklung des Brandszenariums notwendigen Stoffparameter müssen aus den Daten von mindestens 90% der Brandlasten aller brennbare Stoffe im betrachteten Bereich abgeleitet werden, d.h. kleinere Stoffmengen (< 10%) dürfen mit den Stoffparametern der größten Brandlasten bewertet und berücksichtigt werden.

4.4.5.4 Entwicklung von Brandszenarien für die Brandsimulation

Die Brandszenarien werden anhand von vorgegebenen zeitabhängigen Brandleistungskurven oder durch eine Simulation des Brandablaufs auf einer definierten Brandoberfläche mit vorgegebenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten nach 4.4.5.1 durchgeführt.
Bei der Verwendung von Brandleistungskurven müssen die zeitabhängigen Verläufe in Bezug auf die tatsächlich vorhandenen Brandlasten auf Teilflächen oder -abschnitten im BA bzw. BBA wiedergeben und die Anforderungen in Bezug auf die Brandausbreitung nach 4.4.5.1 erfüllen. Weiterhin ist nach jedem Zeitschritt zu kontrollieren, ob eine der vorgegebenen Brandleistung entsprechende Sauerstoffmenge zur Verbrennung zur Verfügung steht. Die zeitabhängige Brandleistung auf einer mit der Zeit veränderlichen Fläche $A(t) \leq A_B$ berechnet sich im brandlastgesteuerten Fall aus:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{spez} \cdot A(t) \tag{54}$$

Oder bei begrenzter Luftzufuhr gemäß:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_v(t) \cdot A(t) \tag{55}$$

Darin sind

$\dot{Q}(t)$ Brandleistung zur Zeit t in kW
$\dot{Q}_{spez}$ spezifische Brandleistung nach Gl. (53) oder (44) in kW/m²
$\dot{Q}_v$ reduzierte spezifische Brandleistung nach Gl. (52) in kW/m²
A (t) aktuelle Brandfläche zur Zeit t in m²

Für die maximale Brandfläche A_B in m² ergibt sich eine maximale mögliche Brandleistung $\dot{Q}_{max}$ aus:

$$\dot{Q}_{max} = \dot{Q}_{spez} \cdot A_B \tag{56}$$

Die Größe der Brandfläche A(t) ist in der Regel zeitabhängig und errechnet sich nach der Brandentzündung auf einer rechteckigen Brandfläche und an bestimmten Entzündungsorten aus den konstanten Brandausbreitungsgeschwindigkeiten v_x und v_y in m/min (s. Tabelle 23, [1, 4, 7–9]), d.h. die Brandfläche errechnet sich wie folgt:

$$A(t) = A_0 + c_A\, v^2\, t^2 \tag{57}$$

Darin sind

v horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit in x- und y-Richtung in m/min
t Branddauer ab der Zeit der Entzündung in min
A_0 Zündfläche ($A_0 < 0{,}01$ m², darf in der Simulation vernachlässigt werden)
c_A Konstante zur Berücksichtigung des Ortes der Zündquelle mit folgenden Werten:
- $c_A = 1$ bei Zündquelle in einer Ecke einer rechteckigen Brandfläche
- $c_A = 2$ bei Zündquelle an einer Wand oder Seite innerhalb einer rechteckigen Brandfläche
- $c_A = 4$ bei Zündquelle im freien Raum und quadratischer Brandfläche
- $c_A = \pi$ bei Zündquelle im freien Raum mit kreisrunder Brandfläche

Aus den Brandszenarien kann der Beginn des Verlöschens am Entzündungsort berechnet werden. Der Zeitpunkt des Verlöschens ergibt sich bei konstanter spezifischer Brandleistung am Entzündungsort aus:

$$t_{z,E} = \frac{Q}{\dot{Q}_{spez}} \tag{58}$$

Darin sind

Q Brandbelastung am jeweiligen Entzündungsort in kWh/m²
$\dot{Q}_{spez}$ konstante spezifische Brandleistung in kW/m²
$t_{z,E}$ Zeitpunkt des Brandendes an dem Entzündungsort in h

Die Branddauer $t_{B,E}$ bei einem brandlastgesteuerten Brand ergibt sich aus der Zeit $t_{B,A}$ für die Brandausbreitung beginnend auf der Zündfläche A_0 bis zum Zeitpunkt des Erreichens der gesamten Brandfläche, zuzüglich der Branddauer an dem Punkt, welcher sich bei Ausbreitungsende zuletzt entzündet hat. Bei konstant verteilter Brandlast auf der Brandfläche gilt für die Branddauer somit:

$$t_{B,E} = t_{B,A} + t_{z,E} \tag{59}$$

Bei der Brandsimulation sind in der Ausgabe der Simulationsergebnisse neben den Eingangsdaten wie Brandbelastungen, spezifische Brandleistungen und Brandausbreitungsgrößen zusätzlich die berechneten bzw. verwendeten Brandleistungskurven und die diesen Kurven zugehörigen zeitabhängigen aktuellen Brandflächen A(t) anzugeben, sodass das Brandszenarium eindeutig bestimmt und nachvollziehbar ist.

4.4.6 Brandszenarien für den Nachweis von $t_{\ddot{a}}$ auf Teilflächen, Teilabschnitten und Ebenen

4.4.6.1 Brandszenarien für Teilflächenbereiche in Brandbekämpfungsabschnitten

Für Teilflächen $A_{B,T}$, welche an Brandbekämpfungsabschnitte grenzen und lokal höhere Brandbelastungen aufweisen, als für den BBA im Mittel festgelegt wurde, d.h. $q_{R,T} > 1{,}6\, q_R$ nach DIN 18230-1:2010, Abschnitt 6.2, ist der $t_{\ddot{a}}$-Wert gesondert zu berechnen. Die Teilflä-

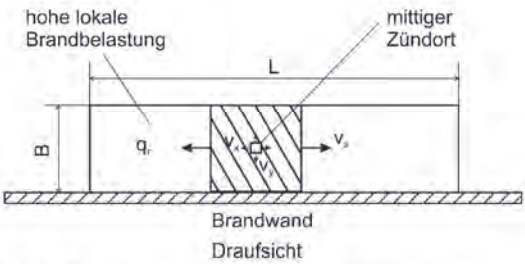


Bild 24. Brandszenarium vor einem Brandbekämpfungsabschnitt

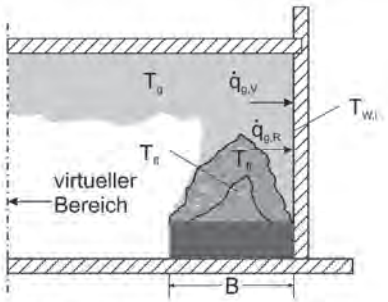


Bild 25. Brandszenarium für lokale Brandbeanspruchung von Wänden (Ansicht)

che $A_{B,T}$ ergibt sich aus der Länge und Breite der betrachteten Teilfläche. Dabei darf für den Nachweis die anzusetzende Teilfläche auf 5% der Fläche des BBA, jedoch nicht mehr als 400 m² beschränkt werden (s. Bild 24). Bei Brandlasten auf Teilflächen $A_{B,T}$ von weniger als 100 m² Flächengröße dürfen auf einer Fläche von 100 m² als gleichmäßig verteilt angesetzt werden.

Die Temperaturen der Rauchgase unterhalb der Decke ($T_{g,t\ddot{a}}$) und die Temperaturen der Gasstrahlung $T_{g,i}$ nach Gl. (60) sowie die mittleren Flammentemperaturen T_{fl} nach Gl. (62) werden im Rahmen der Brandsimulation zeitabhängig berechnet und für die Berechnung von $t_{\ddot{a}}$ im Referenzbauteil zugrunde gelegt. Die Einstrahlzahl $\varphi_{1,2}$ ist mit 1,0 einzusetzen. Die Emission der Flamme ist mit $\varepsilon_{fl} = 1{,}0$ einzusetzen oder für den Einzelfall nachzuweisen [1, 3, 5, 6].

Die Zündquelle ist im Zentrum der festgelegten Teilfläche anzusetzen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist nach Tabelle 23 festzulegen. Nach Erreichen der Zeitdauer t_V bis zum Vollbrand ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf 1 m/min zu erhöhen. Die maßgebende Temperatur-Zeit-Kurve zur Bestimmung von $T_{g,t\ddot{a}}$ ist in 10 cm Abstand unterhalb der Decke im Bereich der Teilfläche $A_{B,T}$ zu ermitteln.

Die Wärmeübergangs- und Strahlungszahlen für den Wärmeübergang auf die angrenzenden Bauteile sind gemäß Abschnitt 4.4.1 anzunehmen. Die Strahlungsverluste in den angrenzenden freien Raum dürfen mit 0,5 × 30% der Brandleistung berücksichtigt werden, soweit keine genaueren Nachweise vorliegen (vgl. Bild 25). Der Wärmeübergang auf der heißen Seite der Bauteile infolge Konvektion und Gasstrahlung ist:

$$q_B = \alpha_i \cdot \left(T_{g,t_{\ddot{a}}} - T_{w,i}\right) + \varepsilon_{i,g} \cdot \varepsilon_b \cdot \left(T_{g,i}^4 - T_{w,i}^4\right) \qquad (60)$$

Werden die Bauteile allein durch Flammenstrahlung beansprucht, dann gilt die folgende Beziehung:

$$q_B = \alpha_i \cdot \left(T_{g,t_{\ddot{a}}} - T_{w,i}\right) + \varphi_{1,2} \cdot \varepsilon_{i,fl} \cdot \sigma \cdot \left(T_{fl,i}^4 - T_{w,i}^4\right) \qquad (61)$$

Die Flammentemperatur T_{fl} errechnet sich näherungsweise für natürliche Brände aus:

$$\frac{T_{fl} - T_0}{T_0} = \frac{(1 - X_r) \cdot Y_{O_2,\infty} \cdot H_v / r}{n \cdot c_p \cdot T_0} \qquad (62)$$

Darin sind

T_0	Umgebungstemperatur: 293 K
$Y_{O2,\infty}$	Sauerstoffgehalt der Luft = 0,23 g O_2/g L
H_u	Heizwert in J/kg
r	stöchiometrischer Sauerstoffbedarf g O_2/g Br
X_r	Strahlungsverlust: $0{,}15 < X_r < 0{,}60$
c_p	spez. Wärmekapazität: 1,0 J/g K
n	Luftüberschuss: $2 < n < 3$ (ohne Nachweis: n = 3)

Für nahezu alle Brennstoffe gilt:

$$\frac{Y_{O_2,\infty} \cdot H_u}{r} = 2900 \text{ J/gL} \qquad (63)$$

Beispiel: Für n = 3 und $X_r = 0{,}3$ (30% Strahlungsverlust) ergeben die Gln. (62) und (63) bei einem Naturbrand ($T_0 = 293$ K) die folgende Flammentemperatur:

$$\frac{T_{fl} - T_0}{T_0} = \frac{0{,}7 \cdot 2{,}9 \cdot 10^3}{3 \cdot 1{,}0 \cdot 293} = 2{,}3094 \quad T_{fl} = 970 \text{ K}$$

Bei der Berechnung von $T_{RBT,NB}(t)$ im Referenzbauteil ist anstelle von Gl. (31) die Gl. (61) maßgebend für die Ermittlung von $T_{RBT,ETK}$, d.h. es sind die Temperatur und die Emissionszahl der Flamme genau zu berücksichtigen.

4.4.7 Plumeformeln für Zonenmodelle

Für die Berechnung der Brandgasmengen muss mindestens eines der nachstehend aufgeführten Plumemodelle verwendet werden:

- Thomas-und-Hinkley-Plumemodell,
- Zukoski-Plumemodell,
- McCaffrey-Plumemodell,
- Heskestad-Plumemodell.

Die Plumeformeln und deren Anwendungsgrenzen sind in [1, 2, 15] beschrieben. In DIN 18230-4 liegt diesbezüglich ebenfalls eine ausführliche Zusammenstellung vor.

Im Zuge der Simulation ist entsprechend dem gewählten Brandszenarium und der vorliegenden geometrischen Verhältnisse automatisch zu kontrollieren, dass die Plumemodelle im Rahmen ihrer vorgegebenen Anwendungsgrenzen verwendet werden. Grundsätzlich ist es erlaubt, auch Kombinationen aus den o. g. Plumemo-

dellen bei der Simulation zu verwenden, wenn dieses aufgrund der Überschreitung von Anwendungsgrenzen für einzelne Plumemodelle erforderlich ist. Die Strahlungsleistung des Feuerplumes ist mit 30 % festgelegt, soweit keine genauere Berechnung erfolgt. Die Wärmeleistung aus der Strahlung wird gemäß dem Strahlungsgesetz anteilig auf die umgebenden Bauteile und die Rauchgasschicht verteilt. Dabei sind die im Abschnitt 5.1 angegebenen Emissionszahlen zu verwenden, sofern keine genaueren Nachweise durchgeführt werden. Anstelle der Plumeformel ist der Vollbrand anzusetzen, sobald die obere Plumekante angrenzende Bauteile (z. B. Wände) erreicht.

4.4.8 Besonderheiten der Brandszenarien bei CFD-Modellen

Außer den im Abschnitt 4.4.5.3 angegebenen Arten der Brandszenarien sind bei der Anwendung von CFD-Modellen zusätzlich die nachstehenden allgemeinen Punkte zu beachten:

- Es ist eine turbulente Verbrennung zu berücksichtigen.
- Es ist ein für CFD-Modelle entwickeltes Strahlungsmodell zu verwenden.
- Die Zellgrößen sind so festzulegen, dass sich bei einer weiteren Verfeinerung der Gitter die Ergebnisse in Bezug auf die Bauteilberechnung nicht wesentlich verändern.
- Es sind wissenschaftlich anerkannte Verbrennungsmodelle anzuwenden.

Bei Abweichungen von den in Abschnitt 4.4.5.3 angegebenen Arten der Brandszenarien sind bei CFD-Modellen folgende zusätzliche Punkte zu beachten:

- Bei den Brandlasten ist stoffbezogen zu rechnen.
- Die Verwendung von Ersatzstoffen ist nicht zulässig.
- Die Reaktionskinetik ist mindestens in einer One-step-reaction darzustellen.

Je nach CFD-Modell sind weitere programmspezifische Parameter zu berücksichtigen. Die oben genannten Punkte sind in der Dokumentation der Brandsimulationsergebnisse zur Vorlage bei Behörden gesondert anzugeben.

4.5 Sicherheitskonzept und Nachweise

4.5.1 Allgemeines

Der folgende Abschnitt behandelt lediglich einige Grundsätze im Sicherheitskonzept der Norm. Im Anhang E der Norm ist das verwendete Sicherheitskonzept im Detail erläutert. In dem Abschnitt 5 wird das Sicherheitskonzept der Industriebaunormen DIN 18230-1 und -4 gemeinsam behandelt.

Für den Nachweis der Tragfähigkeit und des Raumabschlusses von Bauteilen wird die äquivalente Branddauer als erforderliche Feuerwiderstandsdauer angesetzt. Die unmittelbare Anwendung von Gastemperaturen in Verbindung mit Berechnungsverfahren wird im Rahmen von DIN 18230 deshalb nicht behandelt, weil für die Anwendung der MIndBauRL der Bezug auf $t_ä$ erforderlich ist. Die äquivalente Branddauer wird deshalb vor allem zur Bestimmung von erf t_F verwendet, sie dient jedoch auch als Eingangsgröße in der MIndBauRL, zur Bestimmung des erforderlichen Feuerwiderstandes von Bauteilen und kann weiterhin dazu verwendet werden, um Wärmeabzugsfaktoren im Vergleich zur DIN 18230-1 zu berechnen. Die berechnete Größe $t_ä$ bedarf somit einer sicherheitstechnischen Betrachtung, um daraus das erf t_F für Bauteile abzuleiten. Das wesentliche Sicherheitselement ist in diesem Fall die Wahl von geeigneten (abdeckenden) „Szenarien", die aufgrund von Risikobetrachtungen so festzulegen sind, dass auch ungünstige Brandabläufe erfasst werden. „Szenarien" in diesem Sinne sind z. B. die Annahme eines Vollbrandmodells, z. B. auf Teilflächen oder Teilabschnitten oder im gesamten Gebäude, die Annahmen hinsichtlich einer Brandausbreitung über Ebenen, die Mitwirkung oder Teilmitwirkung von Brandlasten in geschlossenen Systemen.

Die thermischen Einwirkungen für die Temperaturberechnungen des Referenzbauteils erfolgen nach den Grundsätzen gemäß DIN EN 1991-1-2 und sind in den Abschnitten 4.3 und 4.4 im Detail beschrieben. Bei der Berechnung der Temperaturen des Referenzbauteils wird ein eindimensionaler Wärmestrom zugrunde gelegt. Die Stoffkennwerte des Referenzbetons sind temperaturabhängig im Detail genormt. Der Bemessungsbrand zur Bestimmung von $t_ä$ wird nach Abschnitt 4.5 der Norm festgelegt, ebenso die bemessungsrelevanten Brandflächen, Teilflächen, Teilabschnitte, usw.

Die Temperaturberechnung des Referenzbauteils wird für die gesamte Dauer des Brandes einschließlich der Abkühlphase durchgeführt. Aus den Rechenergebnissen für $t_ä$ wird unter Berücksichtigung der ermittelten Sicherheitsfaktoren und Beiwerte das erf t_f für die Bauteile des Industriegebäudes bestimmt (s. Abschn. 5 und [1]).

4.6 Dokumentation und Prüfung von Ergebnissen aus Brandsimulationen

Im Hinblick auf die bauaufsichtliche Akzeptanz von Brandschutznachweisen, welche sich auf die Anwendung von Ingenieurmethoden stützen, werden in der Norm besondere Vorgehensweisen vorgeschlagen. Die wesentlichen Elemente der Dokumentation von Ergebnissen aus Brandsimulationen müssen danach die folgenden Hauptpunkte umfassen:

- vollständige Angaben über das Gebäude,
- Angaben über das/die verwendete(n) Rechenmodell(e),
- Angaben zur Brandsimulation (Bauteile, Ventilation, Brandszenarien),
- Ergebnisse äquivalente Branddauer ($t_ä$), evtl. für mehrere variierte Parameter.

Eine detaillierte Unterteilung der obigen Punkte ist im Folgenden angegeben:

1 Allgemeine bauliche Angaben

1.1 Bauwerks- und Nutzungsbeschreibung

1.2 Brandlastaufstellung, thermodynamische Stoffdaten, Unsicherheiten
1.3 Dokumentation Nachweisbereiche: BA, BBA, $t_{ä}$, erf t_f

2 Angaben zu dem verwendeten Rechenmodell
2.1 Rechenmodell für die Brandsimulation
2.2 Rechenmodell für die Bauteilberechnung

3 Angaben zur Brandsimulation zur Ermittlung von „$t_{ä}$"
3.1 Geometrische Modellierung für CFD- oder Zonen-Modelle
3.2 Umfassungsbauteile
3.3 Ventilation (Art und Lage der Öffnungen und die Öffnungsbedingungen)
3.4 Beschreibung der gewählten Brandszenarien mit Begründung
3.5 Simulationsmodelle und Anwendungsbereiche
3.6 Ergebnisse aus der Brandsimulation

4. Angaben zur äquivalenten Branddauer $t_{ä}$
4.1 Ergebnisse Bauteilsimulation
4.2 Maximale Temperatur im Referenzbauteil unter Naturbrand
4.3 $t_{ä}$-Wert nach dieser Norm
4.4 Soweit erforderlich: w-Faktor nach dieser Norm

Die Dokumentation zur Ermittlung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugs durch Brandsimulation muss vollständig, nachvollziehbar und überprüfbar zu sein.

4.7 Anhänge zur DIN 18230-4

4.7.1 Übersicht

Die Anhänge zur Norm umfassen im Einzelnen Übungsbeispiele zur Berechnung von Industriegebäuden, das Referenzszenarium nach DIN 18230-1 sowie Angaben über Gültigkeitsbereiche der verwendeten Plumeformeln.
Der Anhang A behandelt die Berechnung eines Vollbrandszenariums in einer 1 600 m² großen, eingeschossigen Industriehalle. Die Berechnungen wurden mit dem Mehrraum-Zonenmodell MRFC durchgeführt und entsprechend Abschnitt 8 der Norm erläutert und dokumentiert.
Der Anhang B behandelt die Berechnung eines Teilflächenszenariums in einer 10 000 m² großen Industriehalle von 12 m Höhe. Es wurde eine Mehrzonen-Brandsimulation durchgeführt, wobei der relevante Bemessungsbrand von 2 500 m² in Hallenmitte zugrunde gelegt ist. Aufgrund des großen Volumens ist bei diesem Beispiel ebenfalls das Mehrraum-Zonenmodell MRFC zur Anwendung gekommen.
Im Anhang E sind Angaben über die Verbrennungseffektivität von Produktions-, Bau- und Lagerstoffen nach Literaturangaben zusammengestellt. Der Anhang F behandelt die Grundlagen und Erläuterungen zum Abschnitt 9.6, Sicherheitskonzept.

4.7.2 Beispiel für eine Brandsimulation nach Anhang A von DIN 18230-4

4.7.2.1 Aufgabenstellung

Das folgende Beispiel enthält eine Zusammenfassung der in Anhang A der Norm gezeigten Simulationsergebnisse. Untersuchungsgegenstand ist eine kleine Halle mit einer Grundrissfläche von 1600 m² und einer lichten Höhe von 6 m. Die lichten Innenmaße der Halle betragen 40 m × 40 m × 6 m (s. Bild 26). Als Ventilationsflächen stehen Fensterbänder/Lichtbänder im Ausmaß von 40 m² (s. Bild 26) und Tore im Ausmaß von 8 m² zur Verfügung. Es werden keine horizontalen Öffnungen angesetzt.
Die Tore sind mittig auf zwei Seitenwänden verteilt und weisen die Abmessungen von 2 m × 2 m auf (Summe: 2 Tore). Die Lichtbänder werden in allen 4 Seitenwänden jeweils mittig zur Wand angenommen. Die Dimension eines einzelnen Lichtbandes beträgt 10 m × 1 m. Die Unterkante der Lichtbänder liegt in einer Höhe von 4,5 m über der FOK. Die Sturzhöhe von der Oberkante des Lichtbandes bis zur Unterkante der Decke beträgt 0,5 m. Alle Öffnungen werden von Brandbeginn an als geöffnet angenommen. Die Kontraktionskoeffizienten für alle Öffnungen sind mit 0,7 festgelegt. Als Umfassungsbauteile werden 30 cm dicke Betonbauteile angenommen. Diese Bauteile sind den Wänden, der Decke und dem Boden zuzuordnen. Die Materialkennwerte sind nach Abschnitt 4.2.2 der DIN 18230-4 zu verwenden.
Für die Umgebung wird als konstante Randbedingung eine Temperatur von 293,15 K entsprechend 20 °C bei einem Luftdruck von 101330 Pa entsprechend 1 atm festgelegt.
Im vorliegenden Referenzbeispiel ist der Ausbrand der Brandlast nach DIN 18230-4, Abschnitt 5.5.1.9 berücksichtigt. Die Branddauer ergibt sich aus der vorhandenen Brandlast und der angegebenen Pyrolyserate unter Berücksichtigung der Brandentwicklung und des Abklingens des Brandes nach Abschnitt 5.5.4 der DIN 18230-4.

4.7.2.2 Auswertungen

- Als maßgebende Belastung sind nach DIN 18230-4 die Temperaturen im Abstand von 0,1 m unter der Decke über der Brandfläche zu berechnen und anzugeben.
- Die äquivalente Branddauer ist entsprechend den Vorgaben der DIN 18230-4 am Referenzbauteil Beton in 35 mm Tiefe zu bestimmen.
- Es ist während der Simulation die Entwicklung der Rauchschichtgrenze in der Halle darzustellen.
- Es ist in der Halle die zeitliche Entwicklung der Sauerstoffkonzentration in der Kalt- und Heißgasschicht darzustellen.
- Es sind folgende Brandleistungen auf der Brandfläche A_B zeitabhängig anzugeben:
  - theoretische Brandleistung auf Basis der Pyrolyserate [kW],
  - tatsächliche Brandleistung auf Basis der ventilationsabhängigen Abbrandraten [kW].

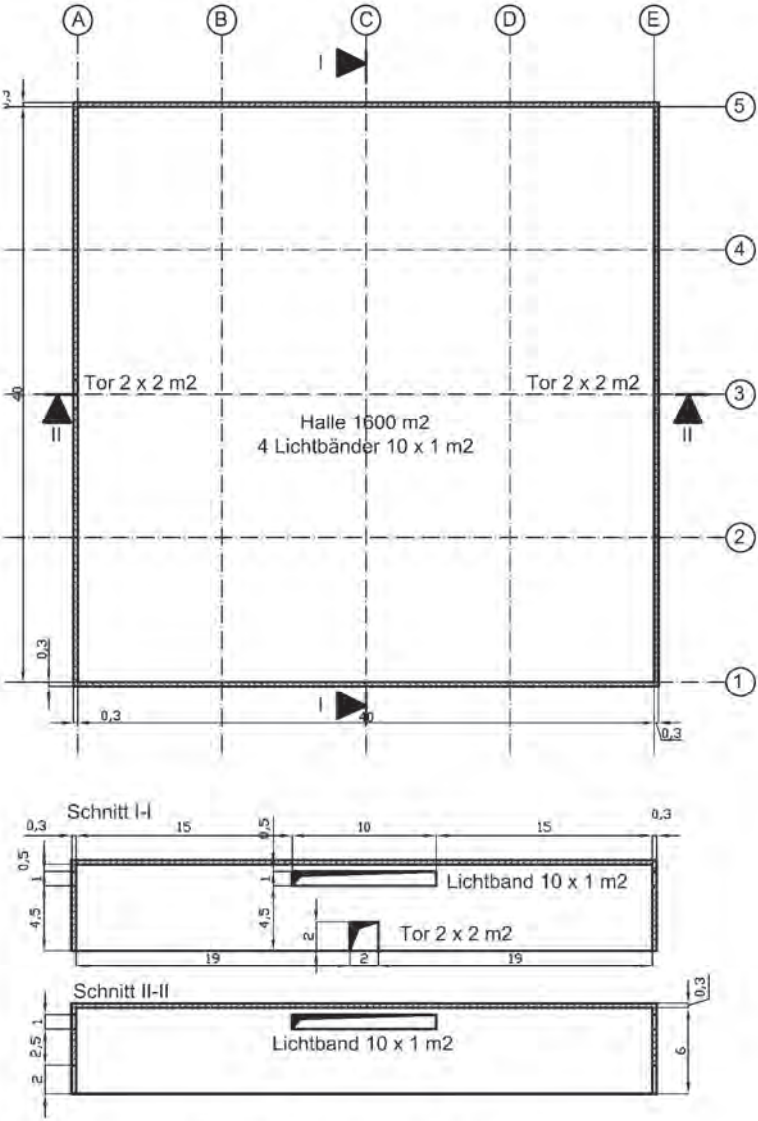


Bild 26. Schematische Darstellung der untersuchten Halle

4.7.2.3 Brandszenarium und Stoffdaten

Ausgehend von der Hallenmitte breitet sich der Brand in alle vier Richtungen mit 1 m/min bis zum Erreichen der Hallenbegrenzung gleichmäßig aus. Die Fläche des Brandherdes soll mit < 100 cm^2 angesetzt werden. Die Brandlastmenge wird mit 10 kg Brennstoff pro Flächeneinheit festgelegt. Für den in Tabelle 26 beschriebenen Stoff entspricht dies einer Brandbelastung von 48 kWh/m^2 (172,8 MJ/m^2). Es werden keine Soot Yields bzw. Kohlenstoffmonoxidanteile vorgegeben. Die Pyrolyserate beträgt 30 kg/m^2h. Dies entspricht einer maximalen spezifischen Brandleistung von

Tabelle 26. Chemische und thermophysikalische Daten zum Brennstoff

Kohlenstoffanteil	0,44 M.-%
Wasserstoffanteil	0,06 M.-%
Sauerstoffanteil	0,50 M.-%
Wasseranteil	0,00 M.-%
Heizwert	17.280 kJ/kg (4,8 kWh/kg)
Verbrennungseffektivität	1,0

144 kW/m² bei einer Verbrennungseffektivität von $\zeta = 1{,}0$. Die angegebene Pyrolyserate stellt eine Massenquelle dar. Die tatsächliche Abbrandrate, bzw. der Brennstoffmassenstrom, welcher die Brandleistung ergibt, ist nach DIN 18230-4, Abschnitt 5.5.2 in der Simulation zu bestimmen.

4.7.3 Simulationsergebnisse mit einem Mehrraum-Zonenmodell

Die Entwicklung der Temperaturen im Referenzbauteil in einer Tiefe von 35 mm unter Normbrand (ETK) und dem simulierten Brand mit einer Brandlast von 10 kg/m² und einer Abbrandrate von 30 kg/m²h sind in Bild 27 dargestellt. Als maximale Temperatur im Referenzbauteil unter dem Bemessungsbrand wurde ein Wert von 216 °C ermittelt. Dies entspricht einer äquivalenten Branddauer von 31,5 min.

Bild 28 zeigt die Entwicklung der Schichtgrenzen der obenliegenden heißen Gasschicht (Rauchschicht). Die Schichtgrenze sinkt im Laufe der Ausbreitung bis zum Boden ab. Ab 20 Minuten Branddauer steht die Halle im Vollbrand, d. h. es wird keine Rauchschicht mehr berechnet, weil die Halle total verraucht ist.

Bild 29 zeigt die zeitliche Entwicklung der Rauchgaskomponente Sauerstoff in der Kalt- und Heißgasschicht. Der Sauerstoffgehalt der Rauchgase sinkt ab 19,5 min Branddauer bis auf 0 Vol.-% ab. Es liegt ein ventilationsgesteuerter Brand vor.

Der Verlauf der Brandleistung ist in Bild 30 dargestellt. Aufgrund der Ventilationsverhältnisse und der Pyrolyserate von 30 kg/m²h tritt ein ventilationsgesteuerter Brand mit einer kurzfristigen, maximalen Leistung von 219 MW auf. Wegen der Ventilationsverhältnisse wird eine quasi stationäre Brandleistung von etwa 163 bis 178 MW erreicht. Diese Brandleistung wird über einen Zeitraum von etwa 12 min aufrecht erhalten. Im Zeitraum zwischen der 19. und der 32. Minute liegt ein ventilationsgesteuerter Brand vor. Nach 40 min Branddauer ist die Brandlast in der Halle vollständig verbrannt bzw. pyrolysiert.

4.8 Zusammenfassung

Die DIN 18230-4 ist eine wesentliche Ergänzung der DIN-Normen für den Industriebau, welche sich neben den Eurocodes mit der Anwendung von Ingenieurmethoden befassen. Sie steht im Einklang mit dem Anhang I der Muster-Industriebaurichtlinie und darf insoweit gemäß Abschnitt 4.3 der MIndBau RL für brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen direkt eingesetzt werden.

Durch die Rückführung der Bemessung von Bauteilen, die nicht dem Normbrand unterliegen, auf eine äquivalente Normbranddauer, ist es möglich, alle Bemessungen auch auf die Klassifizierungen nach Baurecht: feuerhemmend, hochfeuerhemmend und feuerbeständig zurückzuführen [12, 13]. Dieses ist ein großer Vorteil

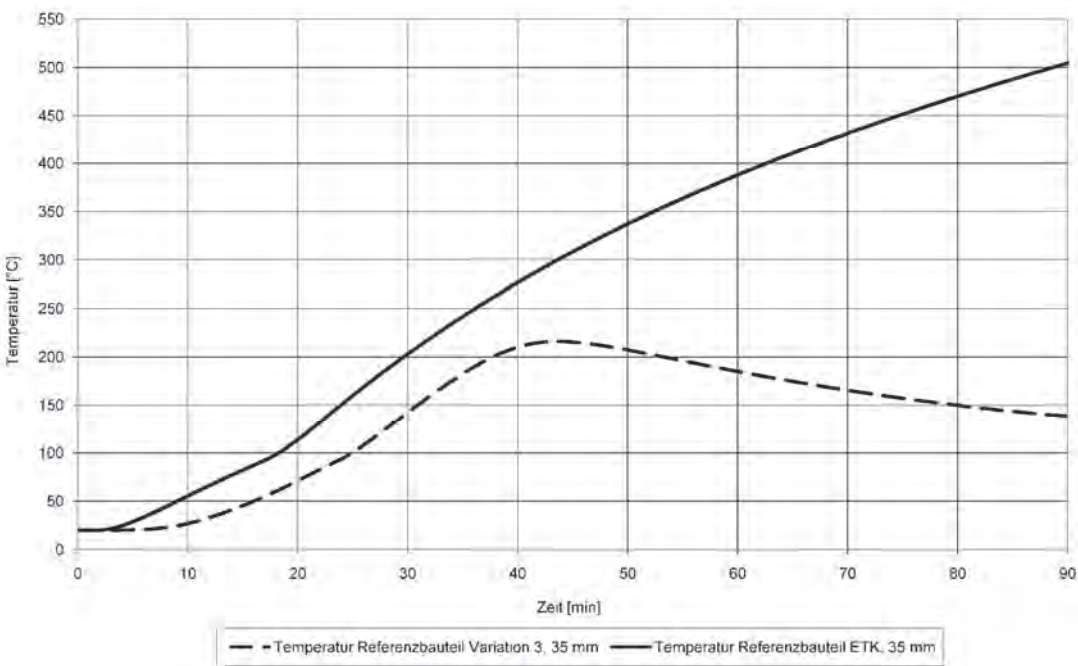


Bild 27. Entwicklung der Temperaturen im Referenzbauteil in einer Tiefe von 35 mm unter Normbrand (ETK) und dem Bemessungsbrand

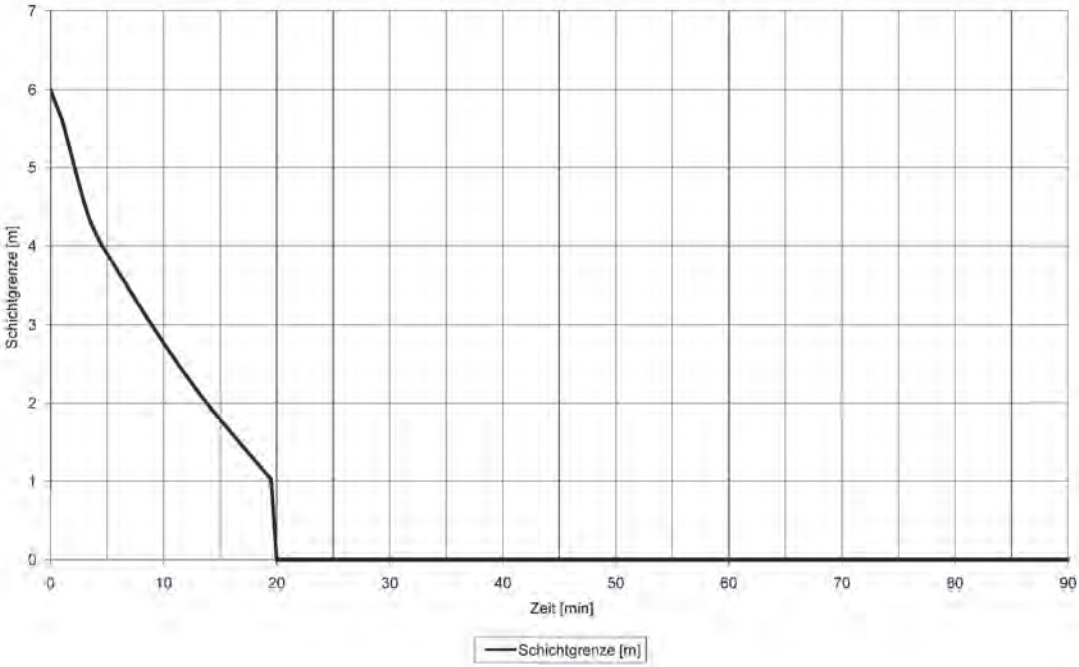


Bild 28. Entwicklung der Schichtgrenzen bei einem Bemessungsbrand mit einer Brandlast von 10 kg/m² und einer Abbrandrate von 30 kg/m²h

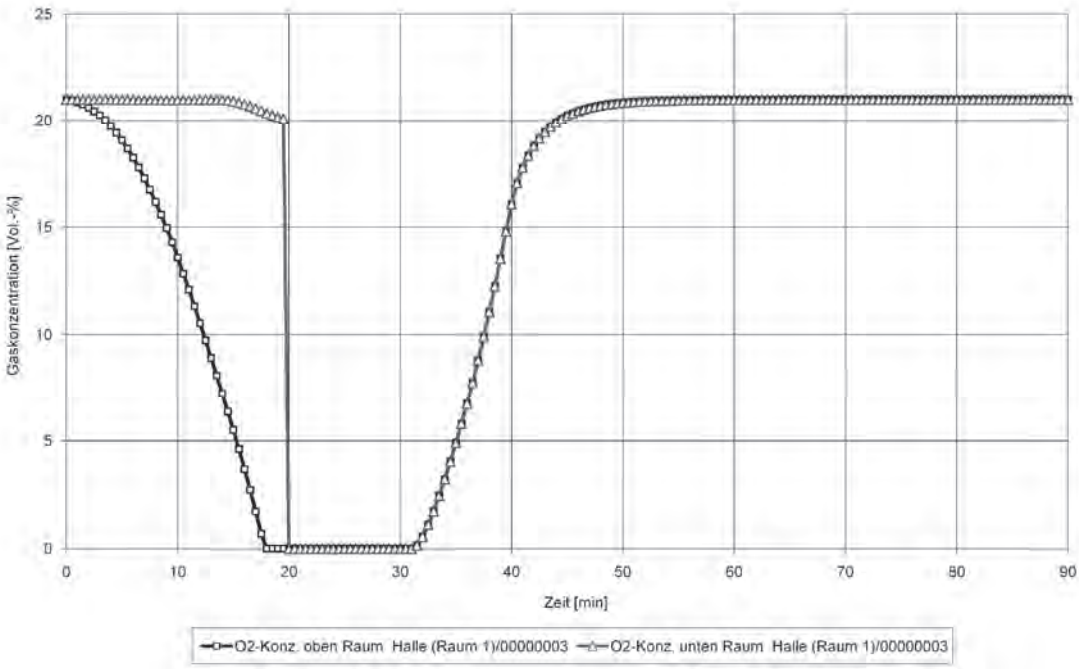


Bild 29. Entwicklung der Sauerstoffkonzentration der Kalt- und Heißgasschicht bei dem Bemessungsbrand auf 1600 m²

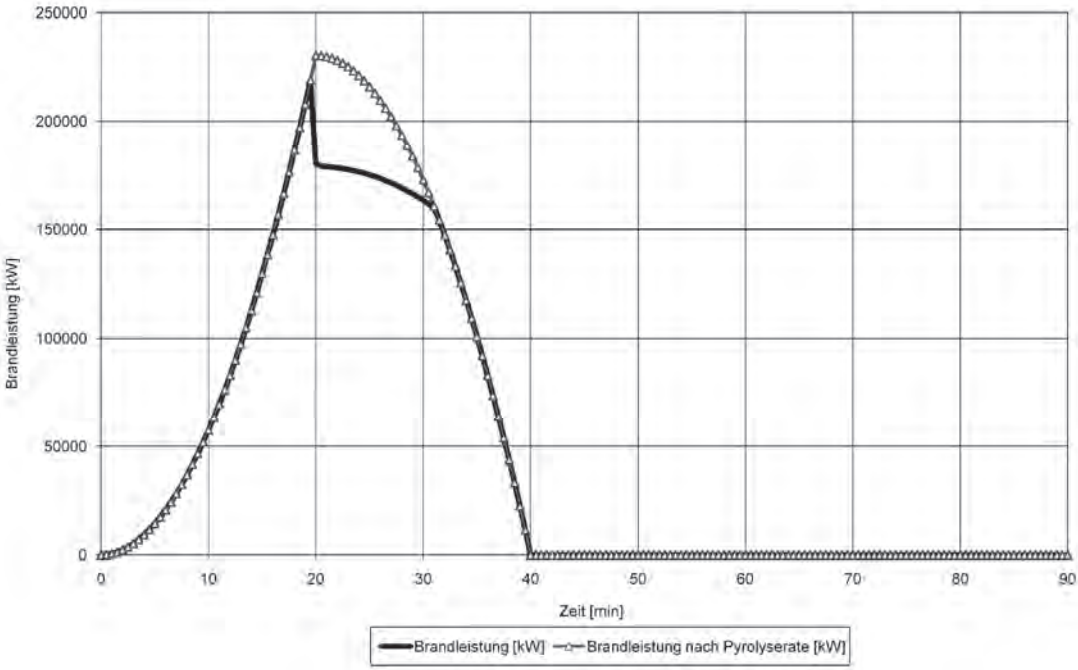


Bild 30. Entwicklung und Verlauf der realen und der theoretischen Brandleistung bei dem Bemessungsbrand auf 1600 m²

gegenüber Brandschutznachweisen für Naturbrände oder parametrische Brandleistungskurven nach DIN EN 1991-1-1-2, weil diese keinen Bezug zu bauaufsichtlichen Klassifizierungen nach der Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve erlauben. Es bleibt abzuwarten, ob die Norm auch auf andere Gebäude als Industriebauten angewendet wird. In diesem Fall ist allerdings eine Überarbeitung der Sicherheitsbeiwerte γ_f und α_L in Bezug auf die vorliegende Gebäudenutzung erforderlich.

5 Sicherheitskonzept der DIN 18230

5.1 Zielsetzung

Das Sicherheitskonzept der DIN 18230 wurde Ende der 70er-Jahren entwickelt [37, 38] und ist ein logisches Modell zur Ableitung von Sicherheitsbeiwerten für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen. Als logisches Modell ist es weniger darauf ausgerichtet, „wahre" Aussagen zu erhalten, z. B. hinsichtlich tatsächlich vorliegender statistischer Verteilungen, vielmehr geht es um plausible Unterschiede bei der Bemessung für unterschiedliche Bedingungen. Das Konzept wurde in den 80er-Jahren vom CIB [28] und später durch das JCSS [34] übernommen und ist im Wesentlichen in DIN EN 1991-1-2/NA [35] enthalten.

5.2 Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden

5.2.1 Entstehungsbrände

Die durchschnittliche Anzahl von Branden pro Jahr und m² Geschossfläche wird als Auftretensrate λ bezeichnet wird. Dabei beschreibt λ die Anzahl aller Brände in Industriebauten, geteilt durch die Gesamtfläche des Industriebaubestands. Werden auch Kleinbrände erfasst, gibt $\lambda = \lambda_1$ die Auftretensrate von Entstehungsbränden an. Seltene Ereignisse, wie Brandereignisse, können als Poisson-Prozess modelliert werden [29, 36]; damit erhält man als Auftretenswahrscheinlichkeit für mindestens einen Entstehungsbrand pro Jahr und m²:

$$P_1 = 1 - \exp(-\lambda_1) \approx \lambda_1 \tag{64}$$

wobei für $\lambda_1 << 1{,}0$ die Wahrscheinlichkeit ungefähr der Auftretensrate entspricht, d. h. $P_1 \approx \lambda_1$. Die Auftretenswahrscheinlichkeit in einer Fläche A nimmt mit der Fläche zu, aber nicht notwendigerweise linear, und kann wie folgt formuliert werden:

$$p_1 \approx \lambda_1 f(A) = b A^{\alpha} \tag{65}$$

Darin sind

A die betrachtete Fläche, die so begrenzt sein muss, dass ein Brandeintrag aus angrenzenden oder darüber/darunter liegenden Gebäudeteilen nicht zu er-

warten ist; in der Regel ist es die Fläche A_B des Brandbekämpfungsabschnitts, fallweise die Fläche A_A eines Teilabschnitts – in m^2

b ein Basiswert der Auftretenswahrscheinlichkeit ($b \cdot A^c$ in Bränden / Jahr)

c ein Exponent, der die proportionale oder unterproportionale Zunahme von Bränden mit der Fläche beschreibt. Theoretisch sind b und c so definiert, dass für die durchschnittliche Fläche $\bar{A}$ von Brandbekämpfungsabschnitten sich $\lambda_i \bar{A} = b \bar{A}^c$ ergibt.

Im Rahmen von DIN 18230-1 wurde bislang eine lineare Zunahme mit der Fläche angenommen und zwar mit

$$b = 5 \cdot 10^{-6} \text{ und } c = 1 \tag{66}$$

Eine umfangreiche Auswertung von Daten der öffentlichen Feuerwehr in England [30] ergab für Industriebauten nur eine Zunahme mit ungefähr $\sqrt{A}$ ($c = 0{,}53$). Daher wird in DIN 18230-4 zunächst folgende Modellierung verwendet

für $A \leq 20.000$ m² nach Gl. (66)
für $A > 20.000$ m² nach Gl. (67)

$$b = 5{,}25 \cdot 10^{-4} \text{ und } c = 0{,}53 \tag{67}$$

Eine Abminderung wäre schon für kleinere Flächen möglich; hierauf wurde verzichtet, um den Unterschied zwischen Teil 1 und Teil 4 zu begrenzen. Bei einer späteren Neufassung der Normen wird eine Anpassung vorgenommen.

5.2.2 Schadenfeuer

Auf der Grundlage der Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 von Entstehungsbränden kann die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} eines Schadenfeuers wie folgt ermittelt werden:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \tag{68}$$

Dabei sind

p_1 Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes gemäß Gl. (65)

p_2 Ausfallwahrscheinlichkeit der manuellen Brandbekämpfung

p_3 Ausfallwahrscheinlichkeit einer automatischen Löschanlage im Anforderungsfall

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_2 der manuellen Brandbekämpfung berücksichtigt sowohl die Selbsthilfemaßnahmen der Betriebsangehörigen ($p_{2,1}$) als auch die Löscharbeiten der Feuerwehr ($p_{2,2}$). Diese wird wiederum bei einer vorhandenen automatischen Brandmeldeanlage entsprechend verringert ($p_{2,3} \approx 0{,}5$).

$$p_2 = p_{2,1} \cdot p_{2,2} \cdot p_{2,3} \tag{69}$$

Zahlenwerte für p_2 und p_3 können Tabelle 27 entnommen werden, die weitgehend mit den Angaben von DIN EN 1991-1-2/NA und [31] übereinstimmen.

Ohne besondere Infrastrukturmaßnahmen ist $p_2 = p_{2,1} \cdot p_{2,2} = 0{,}1$. Da der Löscherfolg verschiedener Maßnahmen nicht völlig voneinander unabhängig ist, soll für das Produkt der Wahrscheinlichkeiten folgender Grenzwert beachtet werden.

$$p_2 \cdot p_3 \geq 2 \cdot 10^{-3} \tag{70}$$

Tabelle 27. Wahrscheinlichkeit $p_{2,1}$, $p_{2,2}$ und p_3

Zeile	Brandbekämpfung durch	Ausfallwahrscheinlichkeit		
		$p_{2,1}$	$p_{2,2}$	p_3
		1	2	3
1a	Betriebsangehörige	0,5		
1b	öffentliche Feuerwehr		0,2	
2	Werkfeuerwehr[1] mit			
2a	vier Staffeln		0,02	
2b	zwei Staffeln		0,05	
3	Automatische Löschanlage			
	Sprinkleranlage[2]			
3a	– nach VdS/CEA Standard			0,02
3b	– in anderen Fällen			0,05
3c	Sonstige Wasserlöschanlage			0,1
3d	Gaslöschanlage			0,1

1) Automatische Brandmeldung und Alarmierung werden vorausgesetzt; die genannten Staffelstärken müssen mindestens zu 50 % aus hauptberuflichen Kräften bestehen.

2) Die Ausfallwahrscheinlichkeit von Sprinkleranlagen beinhaltet Brände, die sich über die Wirkfläche der Sprinkleranlage ausbreiten, sei es aufgrund eines Totalausfalls oder wegen verminderter Löschwirkung.

5.3 Zulässige Wahrscheinlichkeiten im Brandfall

5.3.1 Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit

Aus einer allgemein zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit p_f von Bauteilen und der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem Schadenfeuer kann eine zulässige bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ im Brandfall wie folgt ermittelt werden:

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \leq 1{,}0 \tag{71}$$

Hieraus folgt, dass mit abnehmender Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden die Versagenswahrscheinlichkeit zunehmen darf. Wenn die Auftretenswahrscheinlichkeit hinreichend gering ist, d. h. für $p_{fi} \leq p_f$, kann ein Versagen im Brandfall hingenommen werden – eine Bauteilbemessung für eine erforderliche Feuerwiderstandsdauer ist dann nicht erforderlich.

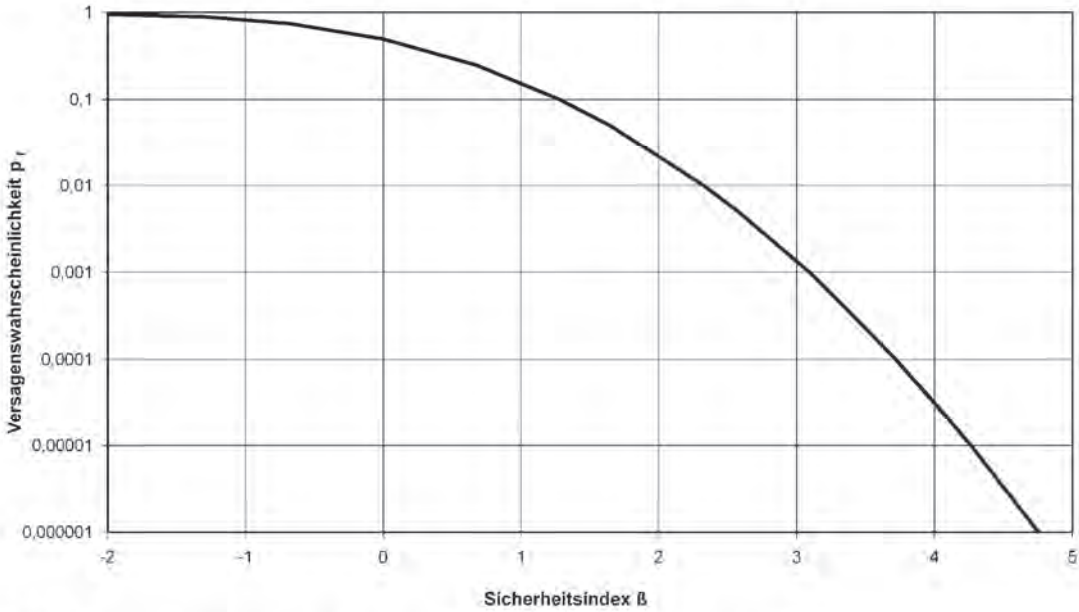


Bild 31. Zusammenhang zwischen der Versagenswahrscheinlichkeit und dem Sicherheitsindex β

5.3.2 Versagenswahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeitsindex β

Um den Zusammenhang zwischen der Bemessung von Bauteilen – mit bestimmten Zahlenwerten für die Einflussgrößen – und der mit dieser Bemessung verbundenen Versagenswahrscheinlichkeit p_f herzustellen, wurde in den 70er-Jahren der Zuverlässigkeitsindex β definiert [27, 32, 33, 37]:

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) \tag{71}$$

Dabei ist Φ( ) die Funktion der Standard-Normalverteilung und Φ^{-1} deren Umkehrfunktion.

Für vorgegebene zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten werden die Zahlenwerte für die Einflussgrößen – im Sinne von Bemessungswerten – dann anhand ihrer Mittelwerte und β-fachen Streuungsmaße beschrieben. Analog erhält man aus der größeren zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall $p_{f,fi}$, einen entsprechend kleineren Sicherheitsindex β_{fi}:

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,fi}) \tag{72}$$

5.3.3 Zulässige Wahrscheinlichkeiten p_f

Ausgehend von den Schadensfolgeklassen von Tabelle B.1 und den Zuverlässigkeitsklassen von Tabelle B.2 des Anhangs B von DIN EN 1990 [37] ergeben sich folgende Zusammenhänge gemäß Tabelle 28 für die normale Bemessung.

Tabelle 28. Schadensfolgeklassen und zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten für die normale Bemessung

Schadensfolge-klassen	Merkmale	Zuverlässigkeits-klassen	Zuverlässigkeits-index β	zul. Versagens-wahrscheinlichkeit p_f
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	RC 3	5,2	$1{,}3 \cdot 10^{-7}$
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	RC 2	4,7	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben und keine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	RC 1	4,2	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 29. Zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten p_f und Zuverlässigkeitsindex β

Mehrgeschossig/ mehrere Ebenen (n > 1)	SK_b3	SK_b2	SK_b1	–
Eingeschossig/ eine Ebene (n = 1)	–	SK_b3	SK_b2	SK_b1
zulässig p_f	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
zulässig β	4,3	3,7	3,1	2,3

Gemäß DIN EN 1990 erfolgt die Regelbemessung für die RC 2. Die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen sind damit begründet, dass ein Versagen sich nicht notwendigerweise ankündigt, sodass bei Gebäuden, in denen sich Personen aufhalten, ein Tragwerksversagen Menschenleben unmittelbar gefährdet. Insofern sind diese Zuverlässigkeitsanforderungen auch für die Bemessung gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen,

- die sich nicht ankündigen,
- die nicht oder nicht rechtzeitig bemerkt werden,

anzusetzen, wenngleich ihre Eintrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden kann.

Nun kündigt ein Schadenfeuer sich nicht an, aber es gibt viele Gebäudesituationen, bei denen ein Schadenfeuer rechtzeitig bemerkt wird, sodass bis zu einer nennenswerten Temperatureinwirkung auf Bauteile das Gebäude geräumt ist. Insbesondere bei Industriebauten ist davon ausgehen, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass

- sich Personen beim Wirksamwerden eines Schadenfeuers noch im Gebäude aufhalten
- die Feuerwehr aus Gründen der Personenrettung ins Gebäude eindringen muss

geringer ist als bei anderen Gebäuden. Daher wurde für Industriebauten im Rahmen von DIN 18230-1:1998-05 bei

- mehrgeschossigen Gebäuden von $p_f = 1 \cdot 10^{-5}$ und
- eingeschossigen Gebäuden von $p_f = 1 \cdot 10^{-4}$

für Bauteile der Brandsicherheitsklasse SK_b3 ausgegangen. Die Wahrscheinlichkeiten für die SK_b2 und SK_b1 (Bauteile mit geringeren Schadensfolgen im Falle eines Versagens) wurden jeweils um eine Zehnerpotenz verringert. Diese Werte wurden auch in der Neufassung von DIN 18230-1 beibehalten; insofern wird auch DIN 18230-4 von diesen Vorgaben ausgehen. Damit erhält man die Wahrscheinlichkeiten gemäß Tabelle 29 je Brandsicherheitsklasse.

5.3.4 Zulässige Wahrscheinlichkeiten $p_{f,fi}$

Unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden p_{fi} gemäß Gl. (68) erhält man aus Gl. (71) zulässige Wahrscheinlichkeiten $p_{f,fi}$ in Abhängigkeit von der Fläche A, der Brandsicherheitsklasse und der Ebenenzahl (p_f für n = 1 oder n > 1).

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{p_f}{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3} = \frac{p_f}{c \cdot A^b \cdot p_2 \cdot p_3} \leq 1{,}0 \qquad (73)$$

Betrachtet man nur die Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden bei der Brandbekämpfung durch Betriebsangehörige und öffentliche Feuerwehr: $p_{fi} = p_1 \cdot p_2$ mit $p_2 = 0{,}1$ erhält man Basiswerte für $p_{f,fi}$ – ohne besondere Infrastruktur.

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{p_f}{c \cdot A^b \cdot 0{,}1} \leq 1{,}0 \qquad (74)$$

Für die Festlegung von Sicherheitsbeiwerten γ erfolgt eine Begrenzung auf $p_{f,fi} \leq 0{,}6$, da eine Bemessung für

Tabelle 30. Basiswerte für $p_{f,fi}$ – ohne besondere Infrastruktur

Fläche A (m²)	$p_f = 1 \cdot 10^{-5}$	$p_f = 1 \cdot 10^{-4}$	$p_f = 1 \cdot 10^{-3}$	$p_f = 1 \cdot 10^{-2}$
2.500	$8{,}0 \cdot 10^{-3}$	$8{,}0 \cdot 10^{-2}$	$6{,}0 \cdot 10^{-1}$	$6{,}0 \cdot 10^{-1}$
5.000	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$	$4{,}0 \cdot 10^{-2}$	$4{,}0 \cdot 10^{-1}$	$6{,}0 \cdot 10^{-1}$
10.000	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2{,}0 \cdot 10^{-2}$	$2{,}0 \cdot 10^{-1}$	$6{,}0 \cdot 10^{-1}$
20.000	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$	$1{,}0 \cdot 10^{-1}$	$6{,}0 \cdot 10^{-1}$
30.000	$6{,}7 \cdot 10^{-4}$	$6{,}7 \cdot 10^{-3}$	$6{,}7 \cdot 10^{-2}$	$6{,}7 \cdot 10^{-1}$
60.000	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$	$3{,}3 \cdot 10^{-3}$	$3{,}3 \cdot 10^{-2}$	$3{,}3 \cdot 10^{-1}$
120.000	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$	$1{,}7 \cdot 10^{-2}$	$1{,}7 \cdot 10^{-1}$

Auftretenswahrscheinlichkeit nach Gl. (66)

Fläche A (m²)	$p_f = 1{,}3 \cdot 10^{-5}$	$p_f = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$p_f = 1 \cdot 10^{-3}$	$p_f = 1 \cdot 10^{-2}$
30.000	$8{,}1 \cdot 10^{-4}$	$8{,}1 \cdot 10^{-3}$	$8{,}1 \cdot 10^{-2}$	$6{,}0 \cdot 10^{-1}$
60.000	$5{,}6 \cdot 10^{-4}$	$5{,}6 \cdot 10^{-3}$	$5{,}6 \cdot 10^{-2}$	$5{,}6 \cdot 10^{-1}$
120.000	$3{,}9 \cdot 10^{-4}$	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$	$3{,}9 \cdot 10^{-2}$	$3{,}9 \cdot 10^{-1}$

Auftretenswahrscheinlichkeit für A > 20.000m² nach Gl. (67)

Versagenswahrscheinlichkeiten nahe bei 1,0 nicht zielführend ist. Die Wahrscheinlichkeiten $p_{f,fi}$ sind in Tabelle 30 dargestellt, wobei die genannte Begrenzung berücksichtigt ist. In den grau hinterlegten Feldern ist rechnerisch $p_{f,fi} > 1{,}0$, d. h. eine brandschutztechnische Bemessung ist nicht erforderlich.

5.4 Sicherheitsbeiwerte

5.4.1 Nachweise

Im Rahmen des Verfahrens der Bauteilbemessung anhand der äquivalenten Branddauer gibt es
- die Feuerwiderstandsdauer t_F und
- die äquivalente Branddauer $t_ä$.

Der Nachweis kann nach folgenden Verfahren erfolgen:

a) Verwendung von klassifizierter Bauteile gemäß
   - der Tabellenwerte von DIN 4102-4,
   - der Tabellenwerte von oder Bemessungshilfen aufgrund von DIN V EN 1992-1-2 bis DIN EN 1995-1-2 und weiteren Teilen entsprechend ihrer bauaufsichtlichen Einführung
   - der angegebenen Feuerwiderstandsklassen in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) oder allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen (abP).

Das gilt gleichermaßen für tragende und raumabschließende Bauteile.

b) Anwendung von Berechnungsverfahren gemäß:
   - DIN 4102-22
   - DIN EN 1992-1-2 bis DIN EN 1995-1-2 [38] und weiteren Teilen entsprechend ihrer bauaufsichtlichen Einführung
   - etwaigen in abZ oder abP (künftig) angegebenen Berechnungsverfahren.

Diese Möglichkeit besteht vornehmlich für tragende Bauteile. Bei Anwendung von Berechnungsverfahren gilt die nominelle Temperatur-Zeit-Kurve nach DIN EN 13501-2 als Brandeinwirkung, die
- bis zum rechnerischen Versagen (für Nachweise im Zeitbereich) oder
- für die Zeitdauer $t = f(t_{ä,d})$ (für Nachweise im Festigkeits- oder Temperaturbereich)

auf ein Bauteil einwirkt.

Für Nachweise im Zeitbereich lautet die Bedingung

$$t_{Fd} \geq t_{äd} \tag{75}$$

mit

t_{Fd} Bemessungswert der Feuerwiderstandsdauer entsprechend den genannten Regelwerken;

$t_{äd}$ Bemessungswert der äquivalenten Branddauer

5.4.2 Grundlagen

Für den Zeitbereich lautet die Versagensbedingung:

$$t_F - t_ä \leq 0 \tag{76}$$

Die Feuerwiderstandsdauer t_F und die äquivalente Branddauer $t_ä$ sind Zufallsgrößen, die selbst wiederum Funktionen von Zufallsgrößen sind. Sie werden durch Verteilungsfunktionen beschrieben. Durch die Bemessung soll erreicht werden, dass die Versagenswahrscheinlichkeit kleiner ist als die zulässige Wahrscheinlichkeit nach Abschnitt 5.3.3.

$$P(t_F - t_ä \leq 0) \leq p_{f,fi} \tag{77}$$

Hierfür werden Bemessungswerte t_{Fd} und $t_{äd}$ als Funktion von $p_{f,fi}$ bzw. β_{fi} und der angenommenen Verteilungsfunktionen bestimmt, sodass für

$$t_{Fd} \geq t_{äd} \tag{78}$$

die Zuverlässigkeitsbedingungen eingehalten werden. Für die praktische Anwendung werden die Bemessungswerte nicht direkt ermittelt, sondern anhand von charakteristischen Werten t_{Fk} und $t_{äk}$, die einem bestimmtem Quantil entsprechen, und zugeordneten Teilsicherheitsbeiwerten ausgedrückt:

$$t_{Fk}/\gamma_{tF} \geq t_{ä(k)} \cdot \gamma_{tä} \tag{79}$$

Der charakteristische Wert der Brandeinwirkung, $t_{ä(k)}$ wird in der Regel als 90%-Quantil festgelegt. Der charakteristische Wert der Feuerwiderstandsdauer t_{Fk} wird tendenziell als 10%-Quantil bestimmt (vgl. hierzu auch Abschn. 5.4.4).

5.4.3 Sicherheitsbeiwerte in DIN 18230-1

Für t_F und $t_ä$ werden Log-Normalverteilungen angenommen, mit Variationskoeffizienten V_{tF} und $V_{tä}$. Die Teilsicherheitsbeiwerte bestimmen sich aus

$$\gamma_{tF} = \exp\left[(\alpha_{tF} \cdot \beta_{fi} + k_{tF}) \cdot \sqrt{\ln(V_{tF}^2 + 1)}\right] \tag{80}$$

$$\gamma_{tä} = \exp\left[-(\alpha_{tä} \cdot \beta_{fi} + k_{tä}) \cdot \sqrt{\ln(V_{tä}^2 + 1)}\right] \tag{81}$$

Für die Linearfaktoren α_{tF} und $\alpha_{tä}$ gilt näherungsweise:

$$\alpha_{tF} \approx \frac{V_{tF}}{\sqrt{V_{tF}^2 + V_{tä}^2}}; \quad \alpha_{tä} \approx \frac{-V_{tä}}{\sqrt{V_{tF}^2 + V_{tä}^2}}$$

$$\text{wobei } \alpha_{tF}^2 + \alpha_{tä}^2 = 1{,}0 \tag{82}$$

Der Sicherheitsbeiwert γ, wie er in DIN 18230-1 verwendet wird, ist dann das Produkt

$$\gamma = \gamma_{tF} \cdot \gamma_{tä} \tag{83}$$

Dabei werden Sicherheitsbeiwerte für die verschiedenen Brandsicherheitsklassen (SK_b) zunächst für Basiswerte von $p_{f,fi}$ ermittelt ($p_2 = 0{,}1$), vgl. Tabelle 30. Für kleinere zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten $p_{f,fi*}$ bzw. größere Sicherheitsindices β_{fi*} aufgrund einer Werkfeuerwehr oder Sprinkleranlage erhält man kleinere Sicherheitsbeiwerte γ^*. Die Anpassung wird mit Beiwerten α_L vorgenommen, die wie folgt definiert sind:

$$\alpha_L = \frac{\gamma^*}{\gamma} = \tag{84}$$

$$\exp\left[\left\{\alpha_{tF} \cdot \sqrt{\ln(V_{tF}^2+1)} - \alpha_{tä} \cdot \sqrt{\ln(V_{tä}^2+1)}\right\} \cdot (\beta_{fi}^* - \beta_{fi})\right]$$

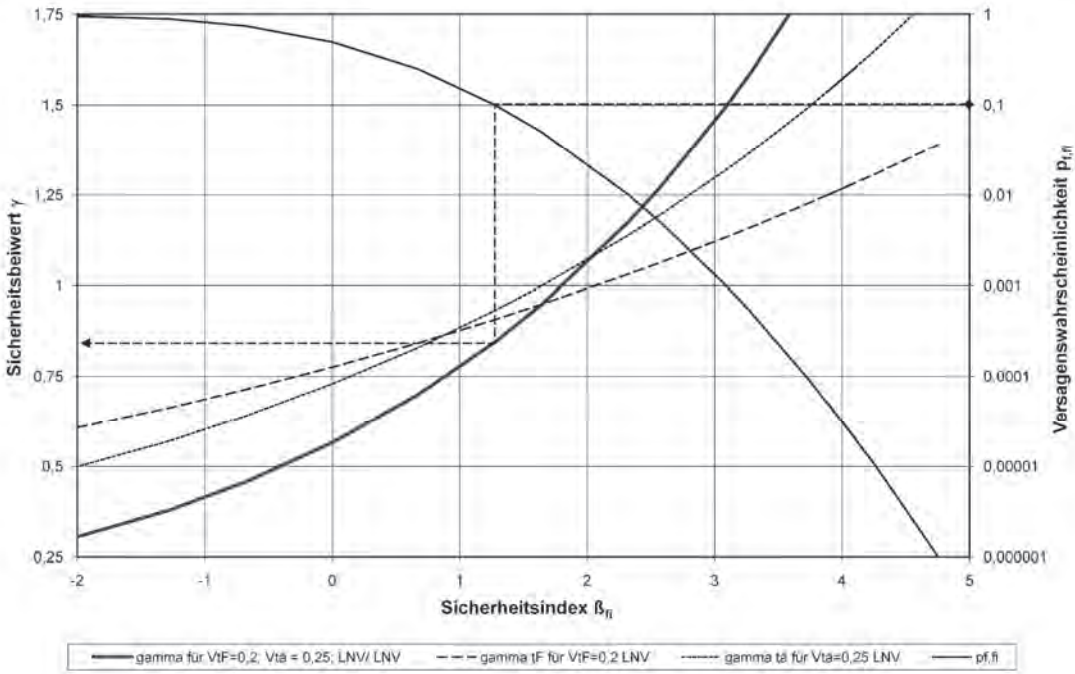


Bild 32. Sicherheitsbeiwerte γ in DIN 18230-1 – ohne besondere Infrastruktur

Das Konzept stammt aus den 70er-Jahren und nimmt hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer Bezug auf klassifizierte Bauteile. Auf der sicheren Seite liegend wurde angenommen, dass der einer Feuerwiderstandsklasse zugeordnete Zahlenwert als charakteristischer Wert einem 10%-Quantil entspricht (z. B. F90 $\rightarrow t_{Fk} = 90$ min.). Die Variationskoeffizienten berücksichtigen nicht nur die Streuung der Einflussgrößen, sondern auch sog. Modellunsicherheiten. Insofern wurde aufgrund von Untersuchungen im Rahmen von [37] $V_{t\ddot{a}} = 0{,}25$ und $V_{tF} = 0{,}2$ angesetzt. Hierfür wird $\alpha_{tF} = 0{,}62$ und $\alpha_{t\ddot{a}} = -0{,}78$. Für die 10%- und 90%-Quantilen ist $k_{tF} = -1{,}28$ und $k_{t\ddot{a}} = +1{,}28$.

Gegenüber den Sicherheitsbeiwerten nach Bild 32 sind die γ-Werte in der Tabelle 2 von DIN 18230-1 gerundet (γ_{Norm}). Insofern wurde α_L nicht gemäß der Definition von Gl. (84) ermittelt, sondern so angepasst, dass

$$\alpha_L = \frac{\gamma^*}{\gamma_{Norm}} \tag{85}$$

5.4.4 Bemessungswert der Feuerwiderstandsdauer

Bei Anwendung von Berechnungsverfahren werden die Einflussgrößen mit den Bemessungswerten entsprechend den in Abschnitt 5.4.1 genannten Regelwerken angesetzt, wobei alle Sicherheitsbeiwerte zu 1,0 angenommen werden dürfen. Ein Sicherheitsbeiwert von 1,0 ist gleichbedeutend mit der Annahme, dass $\alpha_x \cdot \beta = k_x$, wobei die charakteristischen Werte der Einflussgrößen der normalen Bemessung ungefähr 5%- bzw. 95%-Quantilen entsprechen ($k_x = \pm 1{,}64$).

Der Bemessungswert der Feuerwiderstandsdauer t_{Fd} ist der Zeitpunkt für den bei ETK-Beanspruchung $R_d(t) = E_d(t)$ ermittelt wird. Bei zeitlich gleichbleibenden Variationskoeffienten V_R und V_E würde t_{Fd} einem Quantilfaktor k_x/α_x entsprechen; unter Berücksichtigung größerer Streuungen kann zumindest von k_x ausgegangen werden, d. h. t_{Fd} entspricht etwa einem 5%-Quantil. Dies ist insbesondere im Rahmen von DIN 18230 gerechtfertigt, wenn als erforderliche Feuerwiderstandsdauer die nächste Klassengrenze angesetzt und damit ein zusätzlicher Sicherheitsabstand erzeugt wird (z. B. erf $t_F = 79$ min. $\rightarrow$ 90 min.).

Die Berechnungsverfahren wurden anhand klassifizierter Bauteile verifiziert; mithin ist eine rechnerische Feuerwiderstandsdauer von beispielsweise $t_{Fd} = 90$ min. gleichzusetzen der Feuerwiderstandsdauer eines als F90 oder R90 klassifizierten Bauteils.

5.4.5 Sicherheitsbeiwerte in DIN EN 1991-1-2/NA (Anhang B)

Entsprechend DIN EN 1991-1-2/NA [35] wird der Sicherheitsbeiwert auf die Brandbelastung (oder Wärmefreisetzungsrate) angewendet; die Brandeinwirkung ist dann für den Bemessungswert der Brandbelastung q zu berechnen:

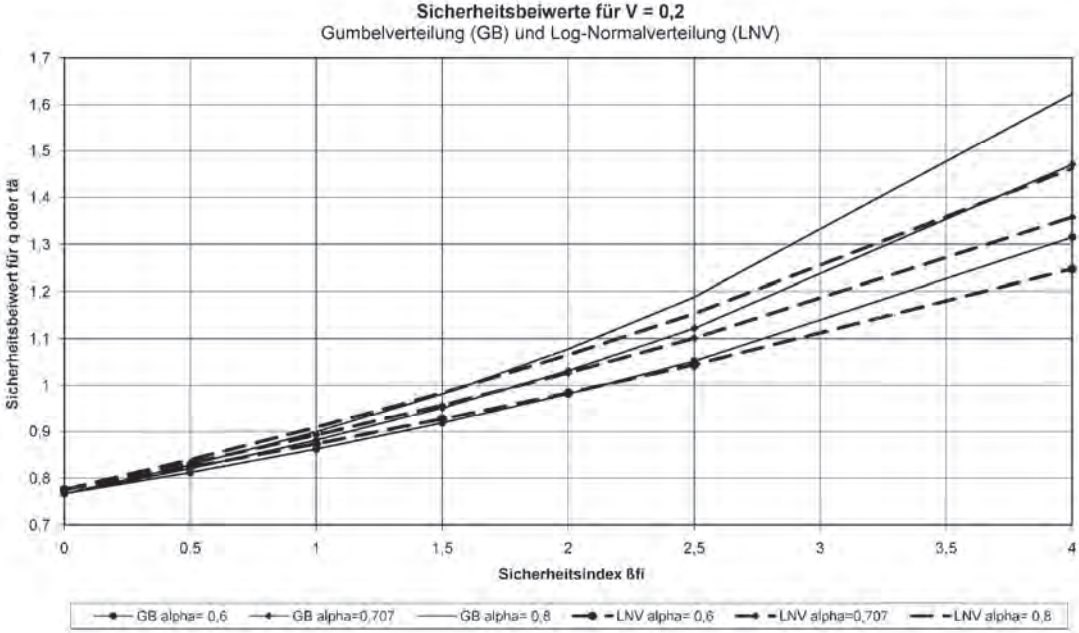


Bild 33. Sicherheitsbeiwerte γ_q oder $\gamma t_{\ddot{a}}$ bei Ansatz einer Gumbel- und einer Log-Normalverteilung für unterschiedliche Linearfaktoren (Alpha)

$$q_d = \gamma_q \cdot q_k \qquad (86)$$

mit

q_k charakteristischer Wert der Brandbelastung im Sinne einer 90%-Quantile

γ_q Sicherheitsbeiwert für q

Als Verteilungsfunktion für die Brandbelastung wird eine Gumbelverteilung vorgeschlagen. Es ist $k_q = 1{,}28$ und $\alpha_q = 0{,}6$ anzusetzen. Bei Ermittlung der Brandbelastung im Einzelfall darf $V_q = 0{,}2$ gesetzt werden. In Bild 33 sind Sicherheitsbeiwerte γ ($\gamma_{t\ddot{a}}$ oder γ_q) aufgrund der Gumbelverteilung und der Log-Normalverteilung in Abhängigkeit von β_{fi} dargestellt, wobei der Linearfaktor α zwischen 0,6 und 0,8 variiert wurde; es ist ersichtlich, dass die Gumbelverteilung etwas ungünstigere Ergebnisse liefert als die Log-Normalverteilung wie sie in DIN 18230 angenommen wird. Allerdings ergeben die höheren Linearfaktoren (Alpha) der DIN 18230 wiederum fast gleiche Sicherheitsbeiwerte.

Die anderen Einflussgrößen der Brandeinwirkung werden entsprechend den Vorgaben der Berechnungsverfahren (mit Sicherheitsbeiwerten 1,0) angesetzt. Die so ermittelte Brandeinwirkung gilt dann als Bemessungswert und ist Eingangsgröße in die Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit. Bei den Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit werden für alle weiteren Einflussgrößen die Sicherheitsbeiwerte zu 1,0 gesetzt – unabhängig von β_{fi}.

5.4.6 Sicherheitsbeiwerte in DIN 18230-4

Anders als in DIN EN 1991-1-2/NA kann für Teil 4 – wie im Teil 1 – ein Sicherheitsbeiwert $\gamma_{t\ddot{a}}$ für $t_{\ddot{a}}$ anstatt für die Brandbelastung q bestimmt werden, da hier nur ein bestimmtes Berechnungsverfahren geregelt wird, wohingegen DIN EN 1991-1-2/NA für verschiedene Berechnungsverfahren anwendbar sein muss. Im Prinzip wird der Ansatz von Teil 1 beibehalten mit folgenden Ergänzungen:

- für die äquivalente Branddauer kann eine geringere Streuung angesetzt werden,
- die Beschreibung der Feuerwiderstandsdauer wird entsprechend Abschnitt 5.4.4 angepasst.

Streuung von $t_{\ddot{a}}$

Es wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Streuungen der äquivalenten Branddauer – bei Ermittlung nach dem Wärmebilanzverfahren – einzugrenzen [1, 4]. Bei diesen Untersuchungen wurden die Brandbelastung q, die Abbrandrate $\dot{R}$ und die Wärmeabzugsflächen A_w schrittweise und in verschiedenen Kombinationen verändert und hierfür $t_{\ddot{a}}$ bestimmt. Die Streuung der äquivalenten Branddauer ergibt sich in Abhängigkeit der Streuungen der Einflussgrößen X (genauer: der Standardabweichungen) aus:

$$\sigma_{t\ddot{a}} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial \dot{R}} \cdot \sigma_{\dot{R}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial A_w} \cdot \sigma_{A_w}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_{\ddot{a}}}{\partial q} \cdot \sigma_q\right)^2} \qquad (87)$$

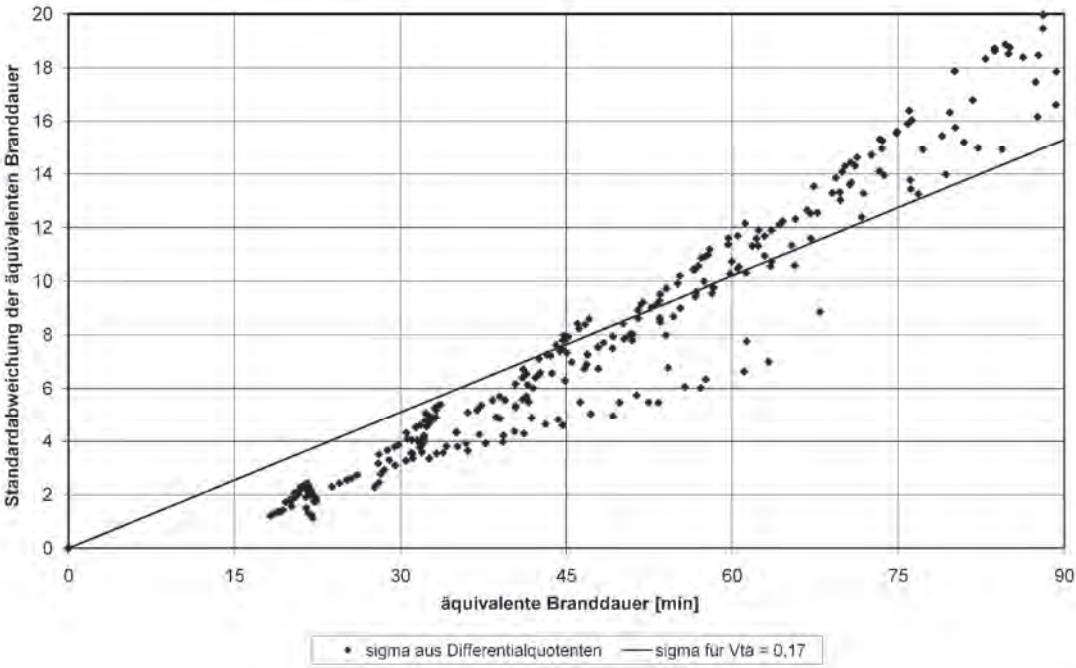


Bild 34. Standardabweichung der äquivalenten Branddauer aus Differenzialkoeffizienten und für $V_{tä} = 0{,}17$

Zunächst vereinfachend über alle Brandregimes hinweg gemittelt, ergab sich:

$$\frac{\partial t_ä}{\partial q} = 0{,}44$$

d. h. eine Vergrößerung von q bildet sich nur knapp zur Hälfte auf $t_ä$ ab. Des Weiteren wurden dann für jeden Datenpunkt $t_ä$ die jeweiligen Differenziale bestimmt. Mit den Differenzialen in Verbindung mit Annahmen für V_x – entsprechend $\sigma_x = m_x V_x$ – bestimmt sich $\sigma_{tä}$ entsprechend Gl. (87) für jede Variation. Nachfolgend sind die Ergebnisse für $V_q = 0{,}2$, $V_R = 0{,}1$ und $V_{Aw} = 0{,}1$ dargestellt. Geht man davon aus, dass Wärmebilanzberechnungen vornehmlich im Bereich $t_ä < 90$ Minuten durchgeführt werden, kann der Variationskoeffizient mit 0,17 angenähert werden. Berücksichtigt man des Weiteren Modellunsicherheiten mit $V_x = 0{,}1$ wird $V_{tä} = 0{,}2$. Hierfür wird dann $\gamma_{tä}$ nach Gl. (81) bestimmt.

Beschreibung der Feuerwiderstandsdauer

Geht man wie in Abschnitt 5.4.5 davon aus, dass die Feuerwiderstandsdauer t_{Fd}, wie sie aus den Berechnungsverfahren und aus der Klassifizierung hervorgeht, einem Bemessungswert entspricht, wäre $\gamma_{tF} = 1{,}0$ zu setzen. Da im Industriebau eine große Bandbreite von Wahrscheinlichkeiten $p_{f,fi}$ bzw. Sicherheitsindices β_{fi} abgedeckt werden muss, wird jedoch eine Anpassung dieser Bemessungswerte abhängig von β_{fi} berücksichtigt. Hierfür wird der Bemessungswert wie ein charakteristischer Wert behandelt, entsprechend aber einem 5%-Quantil. Für $V_{tF} = 0{,}2$ und $k_{tF} = -1{,}64$ werden Sicherheitsbeiwerte nach Gl. (80) bestimmt.

Tabelle 31. Normungsvorschlag für Sicherheitsbeiwerte γ in DIN 18230-4 – ohne besondere Infrastruktur

Mehrgeschossig/ mehrere Ebenen	SK_b3	SK_b2	SK_b1	–
Eingeschossig/ eine Ebene	–	SK_b3	SK_b2	SK_b1
Fläche in m²				
2500	1,10	0,85	0,50	0,50
5000	1,20	0,95	0,60	0,50
10000	1,30	1,00	0,70	0,50
20000	1,35	1,05	0,80	0,50
30000	1,40	1,10	0,85	0,50
60000		1,15	0,90	0,55
120000		1,20	0,95	0,60

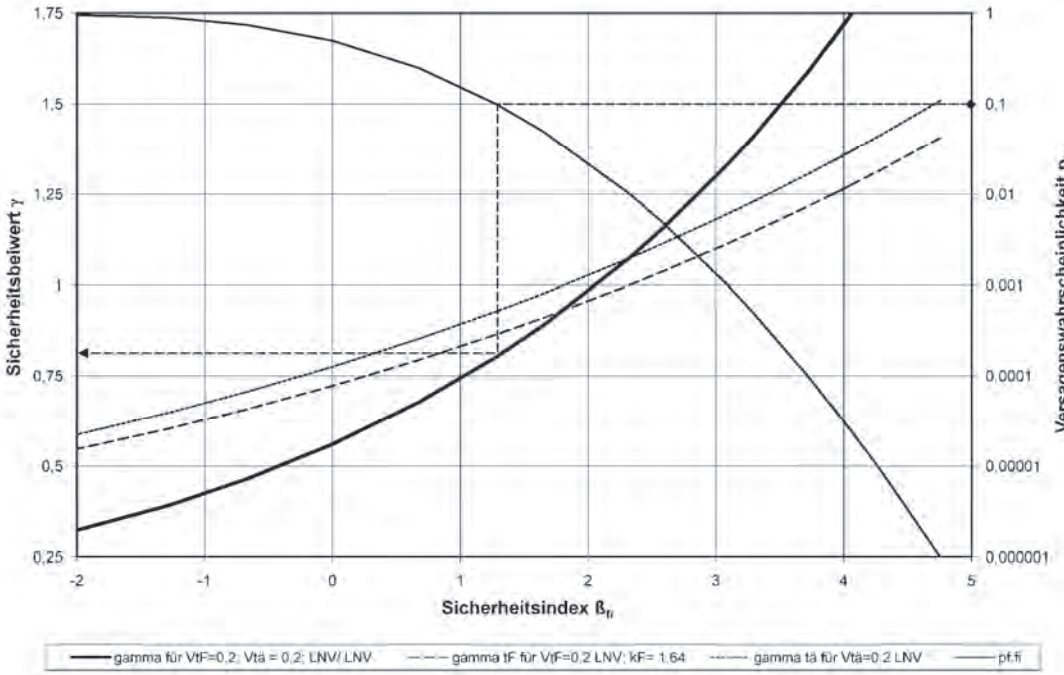


Bild 35. Sicherheitsbeiwerte γ für DIN 18230-4 – ohne besondere Infrastruktur

Hierfür erhält man dann Sicherheitsbeiwerte $\gamma = \gamma_{tF} \cdot \gamma_{tä}$ gemäß Bild 35. Auf der Grundlage dieser Werte werden gerundete Sicherheitsbeiwerte nach Tabelle 31 vorgeschlagen.

In den grau hinterlegten Feldern ist rechnerisch $p_{f,fi} > 1{,}0$, sodass eine Bemessung nicht erforderlich wäre. Wenn eine Bemessung erfolgt, dann ist ein Sicherheitsbeiwert von mind. 0,5 anzusetzen. Es können die gleichen Zusatzbeiwerte α_L wie in DIN 18230-1 verwendet werden (vgl. Abschn. 2.7.2).

6 Literatur

[1] Schneider, U. et al.: Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz, 6. Auflage, Expert Verlag, Renningen, Neuauflage 2010/2011.

[2] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Brandschutz. 2. Auflage, ISBN 978-3-8041-5238-0, 499 S. Werner Verlag GmbH & Co KG, Köln, 2008.

[3] Schneider, U.; Franssen, J.-M.; Lebeda, C.: Baulicher Brandschutz. 2. Auflage, ISBN 978-389932-086-2, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 2008.

[4] DIN 18230-4:2010-10: (Entwurf) Baulicher Brandschutz im Industriebau – Berechnung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugsfaktors durch Brandsimulation.

[5] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB: Neuberechnung der Wärmeabzugsfaktoren w für DIN V 18230, Teil 1, Baulicher Brandschutz im Industriebau, Arbeitsbericht NA-Bau 12.04 AK, Nr. 14-90, Bruchsal/Wien, Mai 1990.

[6] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB: MRFC, Version 2.7. Programmbeschreibung und Benutzerhandbuch, Bruchsal/Wien, September 2000.

[7] Schneider, U.; Max, U. (Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit) und DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.): Beuth-Kommentare, Baulicher Brandschutz im Industriebau, Kommentar zu DIN 18230 und zur Industriebaurichtlinie. 4. Auflage, Beuth Verlag, Berlin, Mai 2011 (geplant).

[8] Hosser, D.: Vergleich der Aussagefähigkeit von experimentellen und rechnerischen Untersuchungen. VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz, 25./26.04.1995, Köln, VdS Publikation 2440.

[9] Max, U.: Zur Berechnung der Ausbreitung von Feuer und Rauch in komplexen Gebäuden. Dissertation Gesamthochschule Kassel, Kassel, 1990.

[10] Schneider, U.: Bewertung des unterschiedlichen Brandverhaltens von Stoffen bei natürlichen Bränden. Beton + Fertigteiltechnik (1972) Heft 9 und Institut für Bautechnik: Baulicher Brandschutz, Berlin 1972.

[11] Schneider, U.: Grundlagen zur Festlegung von Brandszenarien für den Brandschutzentwurf. Zeitschrift vfdb, Heft 3, S. 92–100, 1995.

[12] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Beuth Verlag, Berlin, Sept. 2010.

[13] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebaurichtlinie – MInd-BauRL), Entwurf Okt. 2010.

[14] DIN 18230-3:2002: Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 3: Rechenwerte.

[15] Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht vfdb TB 04-01 Mai 2009, 2. Auflage, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 4, Altenberge; Braunschweig 2009.

[16] Schneider, U.: Strahlungsberechnung in Brandräumen: Entzündung brennbarer Objekte durch Rauchgas- und Flammenstrahlung, Teil 1. vfdb-Zeitschrift, 57. Jahrgang, Heft 3/2008, S. 129–144, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2008.

[17] SFPE (USA): The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, National Fire Protection Association, Quincy, 2008.

[18] Schneider, U.: Strahlungsberechnung in Brandräumen: Entzündung brennbarer Objekte durch Rauchgas- und Flammenstrahlung, Teil 2. vfdb-Zeitschrift, 57. Jahrgang, Heft 4/2008, S. 159–173, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2008.

[19] Schneider, U.: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz. 1. Auflage, Werner Verlag, Neuwied, 2002.

[20] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Brandschutz. Bauphysik-Kalender 2006, S. 237–300, Hrsg.: Nabil A. Fouad, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2006.

[21] Schneider, U.; Max, U.: Baulicher Brandschutz im Industriebau. Beuth Kommentare, 3. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.

[22] Schneider, U.; Max, U.: Brandsimulation unter Berücksichtigung der Sprinklerwirkung. Vfdb-Zeitschrift, 56. Jahrgang, Heft 3/2007, S. 101–121, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2007.

[23] Schneider, U.; Kersken-Bradley, M.; Kirchberger, H.: Brandschutz – Dokumentation einer Entwicklung. Bauphysik, Heft 6, 30. Jahrgang, S. 405–416, ISSN 0171-5445, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2008.

[24] Schneider, U.: Über die Möglichkeit der Umrechnung von natürlichen Bränden auf die Brandbeanspruchung nach DIN 4102-2. Zentralblatt für Industriebau, 19. Jahrgang, Heft 1, S. 24–29, C. R. Vincentz Verlag, Hannover, Jan. 1973.

[25] Schneider, U.: Bewertung des unterschiedlichen Brandverhaltens von Baustoffen bei natürlichen Bränden. (Beitrag zum Berechnungsverfahren nach DIN 18230 E), Betonwerk und Fertigteil-Technik, 38. Jahrgang, Heft 9, S. 653–658, Bauverlag GmbH Wiesbaden, Sept. 1972.

[26] Baulicher Brandschutz für die Planung, Ausführung und Unterhaltung von Gebäuden des Bundes. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Brandschutzleitfaden für Gebäude des Bundes, 3. Auflage, Stand Juli 2006.

[27] Bub, H., et al.: Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen im konstruktiven baulichen Brandschutz. In: Baulicher Brandschutz im Industriebau, Beuth-Verlag, Berlin–Köln, Ausgabe 1979.

[28] Bub, H., Hosser, D., Kersken, M., Schneider, U.: Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz. Brandschutz im Bauwesen, Heft 4, E. Schmidt Verlag, Berlin, 1983.

[29] Lie, T.: Optimum Fire Resistance of Structures. ASCE Journal of the Division, 98 (ST 1), 1972.

[30] Burros, R.: Probability of Failure of Buildings from Fire. ASCE Journal of the Structural Division, 101 (ST9), 1975.

[31] Rutstein, R.; Clarke, M.: The of Fire in Different Sectors of Industry. Fire Surveyor, February 1979.

[32] Cornell, C. A.: Structural Safety Specifications Based on Second-Moment Reliability Analysis. Final Report, IAB-SE Symp. on Concepts of Safety and Methods of Design, S. 235–346, 1969.

[33] NABau im DIN: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen, Ausgabe 1981. Berlin: Beuth Verlag 1981.

[34] CIB W14 – A: Conceptual Approach Towards a Probability Based Guide in Structural Fire Safety. Fire Safety Journal, Vol. 6, No. 1, 1983, ISDN 0329-7112.

[35] JCSS – Joint Committee on Structural Safety – Probabilistic Model Code; Part 2: Load Models, Section 2.20 fire, February 2001.

[36] DIN EN 1991-1-2/NA Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke; Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandwirkungen auf Tragwerke, Nationaler Anhang.

[37] König, G.; Hosser, D.; Schobbe, W.: Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach den Empfehlungen des NABau – eine Erläuterung. Bauingenieur 57 (1982) 69–78.

[38] DIN EN 1990/A1: 2006: Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung.

Fouad, N. A. (Hrsg.)

Bauphysik-Kalender 2011

Schwerpunkt: Brandschutz

(2011. 684 Seiten, 365 Abb., 233 Tab.. Gebunden)

Aus dem Inhalt:

ALLGEMEINES UND REGELWERKE
Brandschutz im Bauordnungrecht
Europäische Harmonisierung im Brandschutz
Bauaufsichtliche Regelungen zum Verwendbarkeitsnachweis
Leistungsbild und Honorierung für den Brandschutz

MATERIALTECHNISCHE GRUNDLAGEN
Kunststoffe und Brandschutz
Brandschutzbekleidungen und -beschichtungen

BAUPHYSIKALISCHE PLANUNGS- UND NACHWEISVERFAHREN
Ingenieurmethoden im Brandschutz
Numerische Brandsimulation im Brandschutz
Perspektiven der Evakuierungsberechnung
Brandschutz im Industriebau
Grundlagen nach Eurocode 1
Brandschutzbemessung von Betonbauteilen nach Eurocode 2
Brandschutztechnische Bemessung im Stahl- und Stahlverbundbau nach Eurocode 3 und 4
Brandschutzbemessung von Holzbauteilen nach Eurocode 5
Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung - Erprobung und Validierung im Stahl- und Stahlverbundbau

KONSTRUKTIVE AUSBILDUNG VON BAUTEILEN UND BAUWERKEN
Brandschutz in Hochhäusern - Kommentar zur Muster-Hochhaus-Richtlinie - MHHR
Brandschutz für Schulen und Kindergärten - Bestand und Sanierung
Brandschutz im Krankenhaus
Brandschutz bei hölzernen Bauteilen nach den nationalen Regeln / Brandschutzkonzepte bei hölzernen Bauwerken
Brandschutz im Bestand

MATERIALTECHNISCHE TABELLEN
Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz
Materialtechnische Tabellen

Fax-Antwort an +49(0)30 47031 240 Ernst & Sohn, Berlin

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	Einzelpreis
	978-3-433-02965-7	Bauphysik-Kalender 2011	☐ € 135,- / sFr 213,- (Einmalbezugspreis) ☐ € 115,- / sFr 182,- (Liefern Sie den Bauphysik-Kalender jährlich nach Erscheinen zum Fortsetzungsbezugpreis*)
	905765	Gesamtverzeichnis Verlag Ernst & Sohn	kostenlos
	2094	Fachzeitschrift Bauphysik - aktuelle Ausgabe (Probeheft)	kostenlos

Liefer- und Rechnungsanschrift: ☐privat ☐geschäftlich

Firma			
Ansprechpartner			Telefon
UST-ID Nr./VAT-ID No.			Fax
Straße//Nr.			E-Mail
Land	-	PLZ	Ort

Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften GmbH & Co. KG
Rotherstraße 21
10245 Berlin
Deutschland
www.ernst-und-sohn.de

Datum/Unterschrift

*Fortsetzungsbezug: Sie sparen € 20,- / sFr 31,-. Beim Fortsetzungsbezug erhalten Sie die jährliche Ausgabe direkt nach Erscheinen (März) zum günstigeren Fortsetzungspreis zugesandt. Die automatische Belieferung können Sie jederzeit jährlich bis zum 30 Januar für die folgende Ausgabe stoppen.
*€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten. Stand: März 2010 (homepage_Probekapitel)