

ICS 13.220.99

Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 4: Brandsimulation

Structural fire protection in industrial buildings –
Part 4: Fire exposure

Sécurité contre l'incendie dans le bâtiment industriel –
Partie 4: Exposition au feu

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden:
Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln eines Fachberichts erstellt.

Gesamtumfang 49 Seiten

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung.....	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen.....	5
3 Begriffe und Symbole.....	5
4 Grundlagen.....	7
4.1 Vorgehensweise.....	7
4.2 Eingangsdaten und Randbedingungen.....	8
4.3 Bemessungsbrand	8
4.4 Auswertung	9
5 Auswirkungen unterschiedlicher Referenzbauteile	11
5.1 Vorgehensweise.....	11
5.2 Referenzbauteile	11
5.3 Vergleichsrechnungen	17
5.4 Schlussfolgerung.....	23
6 Anwendungsbeispiele.....	24
6.1 Vorgehensweise.....	24
6.2 Kleine Halle (400 m ²)	24
6.3 Kleine Halle (1 600 m ²)	30
6.4 Referenzhalle DIN 18230-1 (2 400 m ²).....	36
7 Zusammenfassung	48
Literaturhinweise	49

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 005-52-41 AA „Baulicher Brandschutz im Industriebau – Brandsimulation (DIN 18230-4)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) erarbeitet.

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden. Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln eines Fachberichtes erstellt.

Erfahrungen mit dieser DIN SPEC sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per Email an nabau@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Einleitung

Dieser Fachbericht dokumentiert rechnerische Studien, die für die Erarbeitung einer DIN 18230-4 im Rahmen des Arbeitsauftrages des NA 005-52-41 AA durchgeführt wurden.

Gegenstand des Arbeitsauftrages des NA 005-52-41 AA ist die Erläuterung und Beschreibung der Vorgaben zu den Randbedingungen und Berechnungsansätzen der DIN 18230-1 einschließlich des dort enthaltenen Sicherheitskonzeptes. Ein zukünftiger Teil 4 zur DIN 18230 soll der Anwendung von Brandsimulationen für die Bestimmung von t_a -Werten und w -Faktoren dienen. Es sollen eine Beschreibung des t_a -Verfahrens bearbeitet und Anforderungen an die Dokumentation und Darstellung der Ergebnisse der neu zu regelnden Brandsimulationen aufgestellt werden. Abschließend sind in dieser Norm Vorgaben für eine Plausibilitätsbetrachtung anzugeben.

Die Brandsimulationen sollen insbesondere dann zur Anwendung kommen, wenn gesonderte Nachweise

- für komplexe Gebäudegeometrien,
- für große Brandbekämpfungsabschnitte (z. B. größer 10 000 m²) und
- im Zusammenhang mit Teilflächennachweisen aufgrund ungleichmäßig verteilter Brandlasten oder horizontaler Wärmeabzüge

erforderlich werden. In den vorgenannten Fällen sind die Grundvoraussetzungen zur Durchführung der vereinfachten brandschutztechnischen Bemessung für Industriebauten nach DIN 18230-1 nur noch teilweise erfüllt.

Zum unmittelbaren Vergleich der Rechenergebnisse mit verschiedenen Simulationsprogrammen wurden insbesondere für drei in ihrer Grundfläche unterschiedliche, eingeschossige „Modellgebäude“ Rechenergebnisse für t_a und w ermittelt und deren Bedeutung für die weitere Normungsarbeit an der DIN 18230-4 untersucht.

Der Fachbericht stellt darüber hinaus Ergebnisse der abgeschlossenen Teiluntersuchungen für Referenzbauteile dar.

1 Anwendungsbereich

Im Rahmen des Normungsverfahrens zu DIN 18230-1 sind bereits Brandsimulationen zur Ermittlung von w -Faktoren herangezogen worden, die Grundlage des Berechnungsverfahrens von Teil 1 sind. Zu diesen Anwendungen von Brandsimulationen stellt dieser Fachbericht Informationen bereit.

Bei der Festlegung von normativen Regelungen für DIN 18230-4 ist zu berücksichtigen, dass die hier dokumentierten Berechnungen nur unmittelbar verwertbare Erkenntnisse und Aussagen enthalten, die sich auf „Modellgebäude“ entsprechend der Festlegungen in diesem Fachbericht beziehen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 4102-4, *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen — Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*

DIN 18230-1:2010-09, *Baulicher Brandschutz im Industriebau — Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer*

DIN EN 1363-1, *Feuerwiderstandsprüfungen — Teil 1: Allgemeine Anforderungen*

DIN EN 1991-1-2, *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen — Brandeinwirkungen auf Tragwerke*

DIN ENV 1992-1-2:1997-06, *Eurocode 2 — Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken — Teil 1-2: Allgemeine Regeln; Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung ENV 1992-1-2:1995*

DIN EN 1992-1-2:2010-12, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken — Teil 1-2: Allgemeine Regeln — Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009*

DIN EN 1992-1-2/NA, *Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken — Teil 1-2: Allgemeine Regeln — Tragwerksbemessung für den Brandfall*

DIN EN 1993-1-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-2: Allgemeine Regeln — Tragwerksbemessung für den Brandfall*

3 Begriffe und Symbole

Für die Anwendung dieses Dokument gelten die Begriffe nach DIN 18230-1 und die folgenden Begriffe.

3.1

Bemessungsbrand

definierter Brandverlauf, der bei der Brandschutzbemessung zugrunde gelegt wird

3.2

Äquivalenzverfahren

Bestimmung der äquivalenten Branddauer von Bauteilen auf der Grundlage eines Temperatur-Zeit-Verlaufes, der bei einem Bemessungsbrand ermittelt wurde und nach einer Umrechnung der Bauteiltemperatur auf die Normbrandbeanspruchung nach DIN EN 1363-1 für die Bauteilbemessung verwendet werden kann

3.3

Wärmebilanzverfahren

Bestimmung der Temperaturzeitkurven in Räumen durch Brandsimulation

3.4

äquivalente Branddauer

t_a

Zeit, bei der im betrachteten Referenzbauteil im Normbrand näherungsweise dieselbe Temperatur erreicht wird, wie im Bemessungsbrand

Anmerkung 1 zum Begriff: Angabe in Minuten (min). Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1.

3.5

Wärmeabzugsfaktor

w

dimensionsloser Beiwert (Umrechnungsfaktor), der die Wirkung der vorhandenen vertikalen und horizontalen Wärmeabzugsflächen berücksichtigt

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe DIN 18230-1.

3.6

spezifische Brandleistung

$\dot{q}_{\text{spez}}$

Wärmefreisetzungsrate, bezogen auf die definierte Brandfläche

Anmerkung 1 zum Begriff: Angabe in kW/m².

3.7

Brandleistung

$\dot{Q}$

in einem Brand erzeugte zeitabhängige Wärmeleistung

Anmerkung 1 zum Begriff: Angabe in kW.

3.8

Brandlast

Q

Masse der brennbaren Stoffe auf der definierten Brandfläche, multipliziert mit ihrem unteren Heizwert als Energieinhalt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Masse wird in kg, der untere Heizwert in kWh/kg und der Energieinhalt in kWh angegeben.

3.9

Brandbelastung

q

auf die Brandfläche bezogene Brandlast

Anmerkung 1 zum Begriff: Angabe in kWh/m².

3.10

Brandausbreitungsgeschwindigkeit

q

Geschwindigkeit der Flammenausbreitung auf der Brandfläche in horizontaler (Regelfall) oder vertikaler Richtung

Anmerkung 1 zum Begriff: Angabe in m/min.

3.11**Brandregime**

definiert, ob das Brandgeschehen brandlastgesteuert ($\phi < 1$) oder ventilationsgesteuert ($\phi > 1$) abläuft.

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei der Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate ist das Brandregime zu berücksichtigen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Hierfür muss der Sauerstoffbedarf für die stöchiometrische Verbrennung bekannt sein. ϕ ist definiert als Verhältnis von erforderlichem Sauerstoff zu vorhandenem Sauerstoff, damit gilt für den stöchiometrischen Fall $\phi = 1$, siehe 4.3.2.

3.12**spezifische Abbrandrate**

r'

Masseverlust eines brennenden Stoffes in einer bestimmten Zeit, bezogen auf die Brandfläche

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in $\text{kg/m}^2\text{h}$.

3.13**Verbrennungseffektivität**

χ

Faktor zur Berücksichtigung des Grades der Vollständigkeit der Verbrennung von Brandlasten

3.14**stöchiometrischer Luftbedarf**

ϕ

Luftmenge zur vollständigen Verbrennung eines brennbaren Stoffes entsprechend der zugehörigen stöchiometrischen Gleichung

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in kg Luft je kg Brennstoff.

3.15**konvektiver Wärmeübergangskoeffizient**

α

Menge der konvektiv mit einem Bauteil ausgetauschten Wärme, bezogen auf die Differenz zwischen der Brandgastemperatur und Oberflächentemperatur des Bauteils

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

3.16**Mehrraum-Zonen-Modell**

Brandsimulationsmodell, das die gegebene Raumkonfiguration in mehrere Teilräume mit jeweils unterschiedlichen Zonen abbildet, für die die Massen- und Energiebilanzen gelöst werden

3.17**Feldmodell**

Brandsimulationsmodell, das die gegebene Raumkonfiguration in einem Raumgitter abbildet, für deren Zellen die Impuls-, Massen- und Energiebilanzen gelöst werden

Anmerkung 1 zum Begriff: In der internationalen Literatur wird dieses üblicherweise als CFD-Modell bezeichnet.

4 Grundlagen**4.1 Vorgehensweise**

Das Verfahren der DIN 18230-1 dient der Bestimmung der äquivalenten Branddauer $t_{\text{ä}}$. In diesem Abschnitt werden die Eingangsdaten und Randbedingungen der Beispiele (siehe auch Abschnitt 6) zur Berechnung der äquivalenten Branddauer beschrieben.

4.2 Eingangsdaten und Randbedingungen

Die Berechnungen erfordern konkrete Angaben für folgende Eingangsdaten und Randbedingungen:

- a) Geometrie
 - Unterteilung in Raumbereiche;
 - Grundrissfläche bzw. lichte Innenmaße der Raumbereiche;
 - lichte Höhe der Raumbereiche.
- b) Öffnungen, Ventilation
 - vertikale Ventilationsflächen;
 - horizontale Ventilationsflächen und Brüstungshöhe;
 - zeitliches Verhalten aller Ventilationen;
 - Kontraktionskoeffizient für alle Öffnungen.

Die Kontraktionsbewerte für alle Öffnungen wurden entweder im Zuge der Simulation berechnet oder mit 0,7 festgelegt. Die Kontraktionsbeiwerte der Öffnungen werden dokumentiert.

- c) Umfassungsbauteile
 - Dicke;
 - Dichte;
 - spezifische Wärmekapazität;
 - Wärmeleitfähigkeit;
 - Temperaturleitfähigkeit (ersetzt Dichte und spezifische Wärmekapazität).

Es wird in den nachfolgenden Abschnitten angegeben, ob bei der Berechnung temperaturabhängige Bauteileigenschaften verwendet werden.

- d) Wärmeübergänge
 - Konvektion (heiße Seite);
 - Konvektion (kalte Seite);
 - Strahlungszahl Brandrauch;
 - Emissionszahl Baustoffe;
 - Einstrahlzahl.
- e) Umgebungsbedingungen
 - Temperatur;
 - Luftdruck;
 - Feuchte.

4.3 Bemessungsbrand

4.3.1 Ausbreitungsmodell

Es wird ein geometrisches Ausbreitungsmodell angesetzt.

Bei den geometrischen Ausbreitungsmodellen wird unterstellt, dass die angenommene Brandlast im Brandraum ($l \times b$) gleichmäßig verteilt ist. Das Brandgut verbrennt auf der Brandfläche mit einer konstanten spezifischen Abbrandrate.

Dieses Ausbreitungsmodell verwendet:

- Abmessungen und Lage der Brandfläche zum Zeitpunkt des Brandbeginns;
- Ausbreitungsgeschwindigkeiten, ggf. in verschiedene Raumrichtungen;
- flächenspezifische Abbrandrate oder Brandleistung;
- maximale Ausbreitung der Brandfläche bzw. mögliche Begrenzungen der Brandfläche;
- ggf. Bedingungen für zeitliche Veränderungen der vorgenannten Parameter;
- Brandbelastung.

4.3.2 Brennstoffzusammensetzung/Berücksichtigung des Brandregimes

Für die Unterscheidung, ob ein Brand brandlastgesteuert ($\phi < 1$) oder ventilationsgesteuert ($\phi > 1$) abläuft, muss entweder der Sauerstoffbedarf für die Stöchiometrische Verbrennung oder die Zusammensetzung des Brennstoffes in Bezug auf die brennbaren Bestandteile bekannt sein. ϕ ist definiert als Verhältnis von erforderlichem Sauerstoff zu vorhandenem Sauerstoff, damit gilt für den stöchiometrischen Fall $\phi = 1$.

Bei vorgegebener Brandleistung (Wärmefreisetzung) ist für die Ermittlung der Temperaturwirkungen die Stoffzusammensetzung unerheblich. Sollen ventilationsgesteuerte Brände oder die Zusammensetzung der Rauchgase beurteilt werden, muss ein Brennstoff oder ein stöchiometrischer Luftbedarf vorgegeben werden. Für die Berechnung des stöchiometrischen Luftbedarfes gilt die Beziehung $r_{\text{Luft}} = c_{\text{stoch}} H_u$. Dabei ist c_{stoch} der stöchiometrischer Luftbedarf je kWh Verbrennungsenergie. Als Rechenwert ist hier $c_{\text{stoch}} = 1,13$ kg Luft/kWh festgelegt.

Die Wahl und Ermittlung der verwendeten Parameter wird nachfolgend dokumentiert.

4.3.3 Branddauer

Die Branddauer ergibt sich aus der Brandlast und der Abbrandrate oder Wärmefreisetzungsrate unter Berücksichtigung des Ausbreitungsmodells.

4.3.4 Modellbildung

Die Modellbildung erfolgt unter folgenden Mindestfestlegungen:

- Raumunterteilung bei Zonenmodellen (es wurden nur Einraummodelle untersucht);
- Zellengröße bei Feldmodellen;
- zeitliche Diskretisierung;
- weitere thermodynamische Steuerparameter oder Submodelle (z. B. Plume).

4.4 Auswertung

4.4.1 Allgemeines

Bei der Interpretation der Berechnungsergebnisse sind die Modellunterschiede zwischen Zonenmodellen und Feldmodellen zu berücksichtigen. Während Zonenmodelle im Wesentlichen Mittelwerte globaler Betrachtung ausgeben (z. B. mittlere Heißgastemperaturen, Berücksichtigung der stöchiometrischen Rahmenbedingungen für Zonen und Räume), berücksichtigen Feldmodelle lokale Werte unter detaillierter Berücksichtigung der im Programm implementierten Modelle. Bei der Festlegung von mittleren Temperaturen für die Ermittlung von t_a muss eine Mittelwertbildung der jeweiligen lokalen Temperaturen vorgenommen werden.

Das Zeitintervall für einzelne Ausgabeparameter beträgt im Regelfall 30 s.

4.4.2 Maßgebende Temperaturbelastung

Die maßgebende Temperaturbelastung für die Bauteile beim Zonenmodell ist die Temperatur der Heißgasschicht.

Bei der Verwendung von Feldmodellen wurden die Temperaturen in der jeweils 2. Zelle unter der Decke im Brandraum gemittelt. Dabei wurden entweder alle Zellen oder mindestens 25 gleichmäßig über die Brandraumfläche verteilte Zellen verwendet. Die Temperaturbelastung und -verteilung in vertikalen Stützen wurde nicht betrachtet.

4.4.3 Brandleistung (Wärmefreisetzung)

Es werden als zeitabhängige Größen dokumentiert:

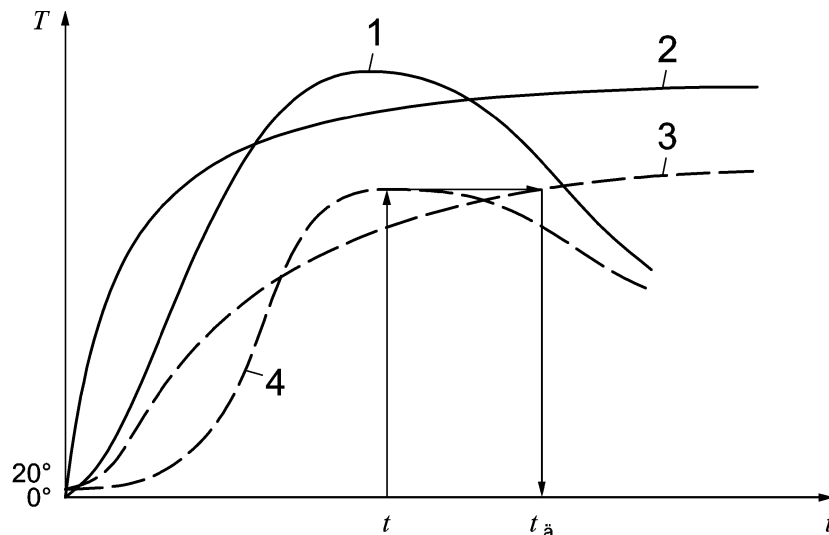
- die Brandleistung (Wärmefreisetzung) des Bemessungsbrandes nach 4.3.1;
- die rechnerisch ermittelte Brandleistung (Wärmefreisetzung) unter Berücksichtigung des Brandregimes.

4.4.4 Sauerstoffkonzentrationen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zur Plausibilitätsprüfung die Sauerstoffkonzentrationen ermittelt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf die Darstellung der Sauerstoffkonzentrationen im Bericht verzichtet.

4.4.5 Äquivalente Branddauer

Die äquivalente Branddauer t_a wird für die Beispiele nach Abschnitt 6 des Fachberichtes an dem Referenzbauteil $d = 200$ mm nach 5.2.3. entsprechend Bild 1 bestimmt.



Legende

- 1 Temperaturen im Brandraum unter Bemessungsbrandbeanspruchung ($T_{\text{Bemessungsbrand}}$)
- 2 Temperaturen entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (T_{ETK})
- 3 Temperatur im Referenzbauteil unter Beanspruchung der Einheits-Temperaturzeitkurve ($T_{\text{Bauteil ETK}}$)
- 4 Temperatur im Referenzbauteil unter Bemessungsbrandbeanspruchung ($T_{\text{Bauteil Bemessungsbrand}}$)
- t Zeit bis zur Erreichung der maximalen Temperatur im Referenzbauteil unter Bemessungsbrandbeanspruchung, in min
- $t_{\text{ä}}$ Zeit in Minuten (min), bei der im betrachteten Referenzbauteil im Normbrand (Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1) näherungsweise dieselbe Temperatur erreicht wird wie im Bemessungsbrand

Bild 1— Definition der äquivalenten Branddauer $t_{\text{ä}}$ für ein Referenzbauteil

5 Auswirkungen unterschiedlicher Referenzbauteile

5.1 Vorgehensweise

In DIN 18230-1 wird für die Ermittlung von $t_{\text{ä}}$ ein Referenzbauteil aus Beton verwendet. In diesem Abschnitt werden Studien zur Auswirkung auf $t_{\text{ä}}$ unterschiedliche Referenzbauteile dokumentiert.

5.2 Referenzbauteile

5.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der Studien wurde das der DIN 18230-1 zugrundeliegende Referenzbauteil aus Beton ($d = 150 \text{ mm}$) mit dem im Rahmen des Normenausschusses NA 005-52-41 AA vorgeschlagenen Betonbauteil ($d = 200 \text{ mm}$) sowie verschiedenen Querschnitten in Stahl verglichen, siehe Bild 2 und Bild 3.

5.2.2 Referenzbauteil **Beton**, $d = 150 \text{ mm}$

Berechnet wird die eindimensionale Temperatursausbreitung in einer 150 mm dicken Betonplatte in horizontaler Anordnung bei unterseitiger Brandbeanspruchung. Der Beton ist vollständig hydratisiert, enthält nahezu thermisch inerte Gesteinskörnungen (Quarz) und hat eine Restfeuchte von 4 % (Massenanteil). Für diesen Beton werden temperaturabhängig die folgenden Stoffkennwerte angesetzt:

$$a_{0,150 \text{ mm}} = 1 - 0,002 \cdot (T - 20) \quad T < 100 \text{ °C}$$

$$a_{0,150 \text{ mm}} = 0,30 \quad T < 140 \text{ °C}$$

$$a_{0,150 \text{ mm}} = 1 - 0,002 \cdot (T - 20) \quad T < 200 \text{ °C}$$

$$\begin{aligned}
 a_{0,150\text{ mm}} &= 0,64 - 0,676\,0 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 200) & T < 525\text{ °C} \\
 a_{0,150\text{ mm}} &= 0,42 & T \geq 525\text{ °C} \\
 \lambda_{0,150\text{ mm}} &= 1,745\,5 + 0,465\,2 + 0,006\,512 \cdot (T - 20) & T < 100\text{ °C} \\
 \lambda_{0,150\text{ mm}} &= 1,745\,5 - 0,000\,872 \cdot (T - 100) & T < 700\text{ °C} \\
 \lambda_{0,150\text{ mm}} &= 1,23 & T \geq 700\text{ °C}
 \end{aligned}$$

Die Dichte des Betons wird über den gesamten Temperaturbereich konstant mit $\rho_{c\,150\text{ mm}} = 2\,400\text{ kg/m}^3$ angenommen.

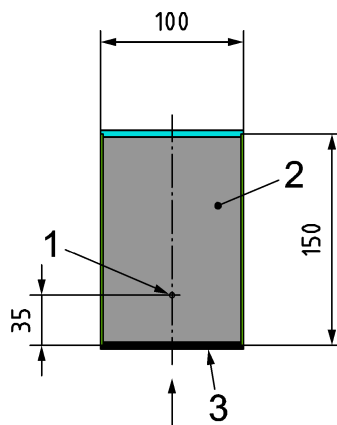
Die spezifische Wärmekapazität berechnet sich aus

$$c_{0,150\text{ mm}} = \frac{\lambda_{0,150\text{ mm}} \cdot 10\,000}{\rho \cdot a_{0,150\text{ mm}}} \quad (1)$$

Dabei ist

- $a_{0,150\text{ mm}}$ die Temperaturleitzahl, in cm^2/s ;
- $\lambda_{0,150\text{ mm}}$ die Wärmeleitfähigkeit, in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
- T die Betontemperatur, in $^{\circ}\text{C}$;
- $c_{0,150\text{ mm}}$ die spezifische Wärmekapazität, in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Maße in Millimeter



Legende

- 1 Referenzposition
- 2 Beton
- 3 Temperaturbelastung (z. B. ETK)

Bild 2 — Referenzbauteil Beton ($d = 150\text{ mm}$)

Für die Berechnungen der zeitabhängigen Temperaturverteilung im Referenzbauteil unter Normbrandbeanspruchung (ETK) wurden die nachstehenden Randbedingungen im Rahmen der Entwicklung von DIN 18230-1 herangezogen (siehe [13]):

- Bauteildicke 150 mm;
- Referenztemperatur in 35 mm Bauteiltiefe;
- Ausgangstemperatur $T_0 = 20\text{ °C}$;

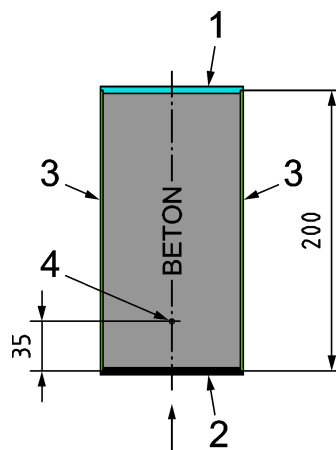
- Konvektion (heiße Seite) wird in MRFC wie folgt berechnet: $\alpha_i = 19,2 + 0,005\,83 \cdot T$ in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; hierbei wird eine konstante Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s zugrunde gelegt;
- Konvektion (kalte Seite) $\alpha_a = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- Emissionszahl Außenseite Referenzbauteil $\varepsilon_a = 0,8$;
- Emissionszahl Innenseite Referenzbauteil $\varepsilon_i = 0,4$.

5.2.3 Referenzbauteil **Beton**, $d = 200 \text{ mm}$

Als Referenzbauteil wird ein Abschnitt einer 200 mm dicken Betonplatte gewählt. Für dieses Betonbauteil werden die Referenztemperaturen wie oben in einer Tiefe von 35 mm berechnet.

Der Temperaturverlauf wird in dem Referenzbauteil aus Beton bei unterseitiger Brandbeanspruchung an der Referenzposition berechnet.

Maße in Millimeter



Legende

- 1 Außenbedingung $T = 20 \text{ °C}$ (Lufttemperatur)
- 2 Temperaturbelastung (z. B. ETK)
- 3 Adiabate Randbedingung
- 4 Referenzposition

Bild 3 — Referenzbauteil Beton ($d = 200 \text{ mm}$)

Für den Beton werden die folgenden thermischen Materialkennwerte nach [12] angesetzt:

Wärmeleitfähigkeit:

für $T_c < 100 \text{ °C}$

$$\lambda_{c,200 \text{ mm}} = 1,745\,5 + 0,116\,3 \cdot F + 0,001\,628 \cdot (T_c - 20) \cdot F$$

für $100 \text{ °C} \leq T_c < 700 \text{ °C}$

$$\lambda_{c,200 \text{ mm}} = 1,745\,5 - 0,000\,872 \cdot (T_c - 100)$$

für $T_c \geq 700 \text{ °C}$

$$\lambda_{c,200 \text{ mm}} = 1,23$$

mit

$\lambda_{c,200 \text{ mm}}$ Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m K})$;

T_c Betontemperatur in °C;
 F Betonfeuchte, Massenteil in %, Ansatz 2 %.

Dichte:

für $20\text{ °C} \leq T_c < 100\text{ °C}$

$$\rho_{200\text{ mm}} = \rho_{tr} + W$$

für $100\text{ °C} \leq T_c < 700\text{ °C}$

$$\rho_{200\text{ mm}} = \rho_{tr} (1,099\,057 - 1,415\,1 \cdot 10^{-4} \cdot T_c)$$

für $700\text{ °C} \leq T_c < 1\,200\text{ °C}$

$$\rho_{200\text{ mm}} = \rho_{tr}$$

mit

ρ_{tr} Dichte des trockenen Betonmaterials, in kg/m³, Ansatz 2 120 kg/m³;

T_c Betontemperatur, in °C;

W Gesamtwassergehalt im Beton; in kg/m³, Ansatz 180 kg/m³.

Wärmekapazität:

für $20\text{ °C} \leq T_c < 100\text{ °C}$

$$c_{200\text{ mm}} = 0,834\,6 + 0,004\,1 \cdot T_c + 10^{-5} \cdot T_c^2$$

für $100\text{ °C} \leq T_c < 140\text{ °C}$

$$c_{200\text{ mm}} = 2,542 - 0,001\,2 \cdot T_c$$

für $140\text{ °C} \leq T_c < 200\text{ °C}$

$$c_{200\text{ mm}} = 0,797\,6 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot T_c + 7 \cdot 10^{-6} \cdot T_c^2$$

für $200\text{ °C} \leq T_c < 525\text{ °C}$

$$c_{200\text{ mm}} = 1,0268 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T_c + 10^{-6} \cdot T_c^2$$

für $525\text{ °C} \leq T_c < 700\text{ °C}$

$$c_{200\text{ mm}} = 1,796 - 0,000\,8 \cdot T_c$$

für $700\text{ °C} \leq T_c < 1\,200\text{ °C}$

$$c_{200\text{ mm}} = 1,22$$

mit

T_c Betontemperatur in °C;

c spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg·K).

Für die Berechnung des Temperaturverlaufs in dem Referenzbauteil werden nach [12] sowohl für den Normbrand als auch für die Naturbrände folgende Wärmeübergangsbedingungen berücksichtigt:

$\alpha_{ci} = 25\text{ W/(m}^2\text{K)}$ konvektiver Wärmeübergang für die brandzugewandte Seite;

$\alpha_{ca} = 5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ konvektiver Wärmeübergang für die brandabgewandte Seite;

$\varepsilon_b = 0,9$ Emissionszahl für den Werkstoff Beton;

$\varepsilon_{f,g} = 0,7$ Emissionszahl im Brandofen.

Diese Werte sind leicht abweichend von den Regelungen der „heißen“ Eurocodes und basieren auf Forschungsarbeiten der Technischen Universität Braunschweig aus den 1980er Jahren (Sonderforschungsbereich 148), und neueren Veröffentlichungen der Technischen Universität Wien [14].

5.2.4 Referenzbauteil *Stahl*

Für das Referenzbauteil Stahl werden die folgenden thermischen Materialkennwerte nach DIN EN 1993-1-2 angesetzt:

Spezifische Wärmekapazität:

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

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

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

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

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

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 73}$$

für $900^\circ\text{C} \leq \theta_c < 1\,200^\circ\text{C}$

$$c_a = 650$$

Wärmeleitfähigkeit:

für $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_a$$

für $800^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1\,200^\circ\text{C}$

$$\lambda_a = 27,3$$

Das vereinfachte Berechnungsverfahren nach DIN EN 1993-1-2 für die Bemessung von Stahlbauteilen im Brandfall unterstellt eine konstante Temperatur über den Bauteilquerschnitt; eine vereinfachende Annahme, die durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Stahls begründet werden kann. Dieses Berechnungsverfahren gilt sowohl für unbedeckte (ungeschützte) als auch für bedeckte (geschützte) Stahlbauteile.

Bei der Berechnung ist der Profilkoeffizient A_m/V eine wichtige Einflussgröße, die das Verhältnis von Wärme aufnehmender Oberfläche zum Wärme aufnehmenden Volumen angibt. In Bild 4 wird die Ermittlung des Profilkoeffizienten A_m/V für allseitige und dreiseitige Brandbeanspruchung angegeben. Dabei wird durch die rote Umrandung in profilfolgend bzw. kastenförmig beflammete Stahlquerschnitte unterschieden. Das Verhältnis A_m/V nach DIN EN 1993-1-2 entspricht dem aus der Praxis bekannten Verhältnis U/A nach DIN 4102-4.