

DIN/TR 18230-4



ICS 13.220.99

Ersatz für
DIN SPEC 18230-4:2015-09**Baulicher Brandschutz im Industriebau –
Teil 4: Brandsimulation**Structural fire protection in industrial buildings –
Part 4: Fire exposureSécurité contre l'incendie dans le bâtiment industriel –
Partie 4: Exposition au feu

Gesamtumfang 114 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Inhalt

	Seite
Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe und Symbole	8
4 Grundlagen	11
4.1 Vorgehensweise	11
4.2 Eingangsdaten und Randbedingungen	11
4.3 Bemessungsbrand	12
4.3.1 Ausbreitungsmodell	12
4.3.2 Brennstoffzusammensetzung/Berücksichtigung des Brandregimes	12
4.3.3 Branddauer	13
4.3.4 Modellbildung	13
4.4 Auswertung	13
4.4.1 Allgemeines	13
4.4.2 Maßgebende Temperaturbelastung	13
4.4.3 Brandleistung (Wärmefreisetzung)	13
4.4.4 Sauerstoffkonzentrationen	14
4.4.5 Äquivalente Branddauer	14
5 Auswirkungen unterschiedlicher Referenzbauteile	14
5.1 Vorgehensweise	14
5.2 Referenzbauteile	14
5.2.1 Allgemeines	14
5.2.2 Referenzbauteil <i>Beton</i> , $d = 150\text{ mm}$	15
5.2.3 Referenzbauteil <i>Beton</i> , $d = 200\text{ mm}$	16
5.2.4 Referenzbauteil <i>Stahl</i>	19
5.3 Vergleichsrechnungen	20
5.3.1 Referenzbauteil <i>Beton</i> , $d = 200\text{ mm}$	20
5.3.2 Referenzbauteil <i>Stahl</i>	21
5.3.3 Temperaturberechnungen mit verschiedenen Programmen	22
5.3.4 Einfluss des Temperaturverlaufs auf die äquivalente Branddauer	23
5.4 Schlussfolgerung	25
6 Anwendungsbeispiele	26
6.1 Vorgehensweise	26
6.2 Kleine Halle (400 m^2)	26
6.2.1 Spezifikation	26
6.2.2 Modellbildung für ein Mehrraum-Zonenmodell	28
6.2.3 Ergebnisse der Simulation	28
6.2.4 Simulationsergebnisse mit dem Zonenmodell FIGARO	30
6.2.5 Simulationsergebnisse mit dem Zonenmodell CFAST	33
6.2.6 Simulationsergebnisse mit einem Feldmodell	36
6.2.7 Ergebnisse	38
6.3 Mittlere Halle ($1\,600\text{ m}^2$)	39
6.3.1 Spezifikation	39
6.3.2 Simulationsergebnisse mit einem Mehrraum-Zonenmodell	41
6.3.3 Simulationsergebnisse mit dem Zonenmodell FIGARO	43
6.3.4 Simulationsergebnisse mit dem Zonenmodell CFAST	46
6.3.5 Simulationsergebnisse mit einem Feldmodell	49
6.3.6 Ergebnisse	52
6.4 Referenzhalle nach DIN 18230-1 ($2\,400\text{ m}^2$)	52

6.4.1	Spezifikation	52
6.4.2	Berechnungen nach DIN 18230-1:2010-09	55
6.4.3	Simulationsergebnisse mit einem Mehrraum-Zonen-Modell	56
6.4.4	Simulationsergebnisse mit dem Zonen-Modell FIGARO	60
6.4.5	Simulationsergebnisse mit dem Zonen-Modell CFAST	63
6.4.6	Simulationsergebnisse mit einem Feldmodell	66
6.4.7	Ergebnisse	69
6.5	Große eingeschossige Halle (10 000 m ²)	71
6.5.1	Spezifikation	71
6.5.2	Simulationsergebnisse mit einem Mehrraum-Zonenmodell	74
7	Dokumentation	109
8	Zusammenfassung	110
8.1	Möglichkeiten zur Ermittlung der äquivalenten Branddauer	110
8.2	Anwendung des Verfahrens nach Bild 84, Spalte 3	112
	Literaturhinweise	113

Bilder

Bild 1	— Definition der äquivalenten Branddauer $t_{\text{ä}}$ für ein Referenzbauteil, links: Temperaturen im Brandraum oberhalb der ETK, rechts: Temperaturen im Brandraum unterhalb der ETK	14
Bild 2	— Referenzbauteil Beton ($d = 150 \text{ mm}$)	16
Bild 3	— Referenzbauteil Beton ($d = 200 \text{ mm}$)	17
Bild 4	— Ermittlung des Profilkfaktors für Stahlbauteile unter allseitiger und dreiseitiger Brandbeanspruchung für profilfolgende und kastenförmige Bekleidung aus [9]	20
Bild 5	— Berechnete Temperaturverteilungen nach 15 min, 30 min, 60 min und 90 min bei Beanspruchung nach Einheit-Temperaturzeitkurve (ETK) (DIN 4102-2)	20
Bild 6	— Berechnete Temperaturen nach einer vierseitigen Brandbeanspruchung nach der Einheit-Temperaturzeitkurve für einen Stahlträger und ein Blech mit einem Profilkfaktor $A_p/V = 131 \text{ m}^{-1}$	21
Bild 7	— Berechnete Temperaturentwicklungen unter Normbrandbeanspruchung im Referenzbauteil in der definierten Referenzposition mit verschiedenen Simulationsprogrammen für die Materialgesetze des Referenzbauteils $d = 200 \text{ mm}$	22
Bild 8	— Berechnete Temperaturentwicklungen unter Normbrandbeanspruchung im Referenzbauteil in der definierten Referenzposition mit verschiedenen Materialgesetzen	23
Bild 9	— Beispiele für Temperaturzeitkurven	24
Bild 10	— Berechnete äquivalente Branddauern $t_{\text{ä}}$ für die Bemessungsbrände aus Bild 9 für die Referenzbauteile aus Beton und Stahl	25
Bild 11	— Schematische Darstellung der Hallengeometrie (400 m ²)	27
Bild 12	— Zeitlicher Verlauf der Brandleistung (Wärmefreisetzung) im Brandraum (MRFC 400 m ²)	29
Bild 13	— Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (MRFC 400 m ²)	29
Bild 14	— Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (MRFC 400 m ²)	30
Bild 15	— Zeitlicher Verlauf der Brandleistung (Wärmefreisetzung) im Brandraum (FIGARO 400 m ²)	31
Bild 16	— Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (FIGARO 400 m ²)	32
Bild 17	— Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (FIGARO 400 m ²)	33
Bild 18	— Zeitlicher Verlauf der Brandleistung (Wärmefreisetzung) im Brandraum (CFAST 400 m ²)	34
Bild 19	— Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (CFAST 400 m ²)	35
Bild 20	— Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (FIGARO 400 m ²)	36
Bild 21	— Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Berechnungsgebiet (FDS 400 m ²)	37

Bild 22 — Gemittelte Temperaturentwicklung über alle Zellen unter dem Dach (FDS 400 m ²) . .	37
Bild 23 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (FDS 400 m ²)	38
Bild 24 — Schematische Darstellung der Hallengeometrie (1 600 m ²)	40
Bild 25 — Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Brandraum (MRFC 1 600 m ²)	41
Bild 26 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (MRFC 1 600 m ²)	42
Bild 27 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (MRFC 1 600 m ²) . . .	43
Bild 28 — Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Brandraum (FIGARO 1 600 m ²)	44
Bild 29 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (FIGARO 1 600 m ²)	45
Bild 30 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (FIGARO 1 600 m ²) . .	46
Bild 31 — Brandleistung (Wärmefreisetzung) des Bemessungsbrandes	47
Bild 32 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (CFAST 1 600 m ²) . . .	48
Bild 33 — Bauteiltemperatur im Referenzbauteil	49
Bild 34 — Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Berechnungsgebiet sowie in der Modellhalle (FDS 1 600 m ²)	50
Bild 35 — Gemittelte Temperaturentwicklung über alle Zellen unter dem Dach (FDS 1 600 m ²) .	51
Bild 36 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (FDS 1 600 m ²)	51
Bild 37 — Schematische Darstellung der Hallengeometrie (2 400 m ²)	54
Bild 38 — Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Brandraum (MRFC 2 400 m ²)	57
Bild 39 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (MRFC 2 400 m ²)	58
Bild 40 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (MRFC 2 400 m ²) . . .	59
Bild 41 — Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Brandraum (FIGARO 2 400 m ²)	60
Bild 42 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (FIGARO 2 400 m ²)	61
Bild 43 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (FIGARO 2 400 m ²) . .	62
Bild 44 — Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Brandraum (CFAST 2 400 m ²)	63
Bild 45 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (CFAST 2 400 m ²)	65
Bild 46 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (CFAST 2 400 m ²) . . .	65
Bild 47 — Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Berechnungsgebiet (FDS 2 400 m ²)	67
Bild 48 — Gemittelte Temperaturentwicklung über 25 Zellen unter dem Dach (FDS 2 400 m ²) . .	68
Bild 49 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (FDS 2 400 m ²)	69
Bild 50 — Zusammenfassung der Ergebnisse der 2 400 m ² -Halle im Vergleich zu DIN 18230-1 .	70
Bild 51 — Zusammenfassung der Ergebnisse der 2 400 m ² -Halle im w -Faktor-Diagramm	71
Bild 52 — Schematische Darstellung der Hallengeometrie (10 000 m ² ohne Unterteilung)	72
Bild 53 — Festlegung Randabstand Brandfläche zu freien Raumgrenzen	73
Bild 54 — Schematische Darstellung der Hallengeometrie (Brandfläche 10 000 m ²)	75
Bild 55 — Zeitlicher Verlauf der Brandfläche im Brandraum (MRFC 10 000 m ²)	76
Bild 56 — Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzung im Brandraum (MRFC 10 000 m ²)	77
Bild 57 — Zeitlicher Verlauf der Dicke der raucharmen Schicht im Brandraum (MRFC 10 000 m ²)	78
Bild 58 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (MRFC 10 000 m ²)	79
Bild 59 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (MRFC 10 000 m ²) . .	81
Bild 60 — Schematische Darstellung der Hallengeometrie (Brandfläche 1 600 m ²)	82
Bild 61 — Zeitlicher Verlauf der Brandfläche und Wärmefreisetzung im Brandraum bei 1 600 m ² Brandfläche	83
Bild 62 — Zeitlicher Verlauf der verbleibenden Masse des Brandgutes und der eingetragenen Wärmemenge im Brandraum bei 1 600 m ² Brandfläche	84
Bild 63 — Zeitlicher Verlauf der Dicke der Heißgasschicht im Brandraum bei 1 600 m ² Brandfläche	85

Bild 64 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum bei 1 600 m ² Brandfläche	86
Bild 65 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil bei 1 600 m ² Brandfläche	88
Bild 66 — Schematische Darstellung der Hallengeometrie (Brandfläche 2 400 m ²)	89
Bild 67 — Zeitlicher Verlauf der Brandfläche im Brandraum (Brandfläche 2 400 m ²)	90
Bild 68 — Zeitlicher Verlauf der verbleibenden Masse des Brandgutes und der eingetragenen Wärmemenge im Brandraum bei 2 400 m ² Brandfläche	91
Bild 69 — Zeitlicher Verlauf der Rauchschichtdicke im Brandraum bei 2 400 m ² Brandfläche . .	92
Bild 70 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum bei 2 400 m ² Brandfläche	93
Bild 71 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil bei 2 400 m ² Brandfläche	95
Bild 72 — Schematische Darstellung der Hallengeometrie (Brandfläche 3 200 m ²)	96
Bild 73 — Zeitlicher Verlauf der Brandfläche im Brandraum (Brandfläche 3 200 m ²)	97
Bild 74 — Zeitlicher Verlauf der verbleibenden Masse des Brandgutes und der eingetragenen Wärmemenge im Brandraum bei 3 200 m ² Brandfläche	98
Bild 75 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum bei 3 200 m ² Brandfläche	99
Bild 76 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum bei 3 200 m ² Brandfläche	100
Bild 77 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil bei 3 200 m ² Brandfläche	102
Bild 78 — Schematische Darstellung der Hallengeometrie (Brandfläche 4 800 m ²)	103
Bild 79 — Zeitlicher Verlauf der Brandfläche im Brandraum (Brandfläche 4 800 m ²)	104
Bild 80 — Zeitlicher Verlauf der verbleibenden Masse des Brandgutes und der eingetragenen Wärmemenge im Brandraum bei 4 800 m ² Brandfläche	105
Bild 81 — Zeitlicher Verlauf der Dicke der Heißgasschicht im Brandraum bei 4 800 m ² Brandfläche	106
Bild 82 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum bei 4 800 m ² Brandfläche	107
Bild 83 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil bei 4 800 m ² Brandfläche	109
Bild 84 — Zusammenfassung	110

Tabellen

Tabelle 1 — Chemische und Thermophysikalische Daten zum Brennstoff	27
Tabelle 2 — Ergebnisse kleine Halle (400 m ²)	38
Tabelle 3 — Äquivalente Branddauer aus den Berechnungen	52
Tabelle 4 — Untersuchte Varianten 2 400 m ² -Halle	52
Tabelle 5 — Öffnungsflächen der untersuchten Varianten (2 400 m ²)	53
Tabelle 6 — Materialkennwerte bei Raumtemperatur	55
Tabelle 7 — Ergebnisse der Berechnung der äquivalenten Branddauer (2 400 m ² -Halle)	56
Tabelle 8 — Ergebnisse t_{Δ} MRFC 2 400 m ² -Halle	59
Tabelle 9 — Ergebnisse t_{Δ} FIGARO 2 400 m ² -Halle	62
Tabelle 10 — Ergebnisse t_{Δ} CFAST 2 400 m ² -Halle	66
Tabelle 11 — Ergebnisse t_{Δ} FDS 2 400 m ² -Halle	69
Tabelle 12 — Maximale Bauteiltemperatur im Referenzbauteil und Äquivalente Branddauer aus den Berechnungen	71

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.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Technische Reporte sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Erfahrungen mit diesem Technischen Report sind erbeten:

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

DIN 18230, *Baulicher Brandschutz im Industriebau* besteht aus:

- *Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer*
- *Teil 3: Rechenwerte*
- *Teil 4: Brandsimulation*

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN SPEC 18230-4:2015-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) redaktionelle Überarbeitung;
- b) Ergänzung der Anwendungsbeispiele 6.1 bis 6.4 um die Simulationsergebnisse weiterer Brandsimulationsprogramme;
- c) Ergänzung der Abschnitte 6.5 und 8.

Frühere Ausgaben

DIN SPEC 18230-4: 2015-09

Einleitung

Dieser Fachbericht dokumentiert rechnerische Studien, die für die Erarbeitung eines DIN/TR 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. Der Teil 4 der Normenreihe DIN 18230 soll der Anwendung von Brandsimulationen für die Bestimmung von $t_{\text{ä}}$ -Werten und w -Faktoren dienen.

Entsprechend DIN 18230-1 wird der w -Faktor nach DIN 18230-1 mit Modellen der Wärmebilanztheorie ermittelt, wenn das Näherungsverfahren nach DIN 18230-1:2010-09, Abschnitt 8 nicht angewendet werden soll.

ANMERKUNG In der Erläuterung zur DIN 18230-1 ist das Szenarium beschrieben, das den in DIN 18230-1:2010-09, Abschnitt 8 ermittelten w -Faktoren zugrunde liegt.

Es wird eine Beschreibung des $t_{\text{ä}}$ -Verfahrens bearbeitet und Anforderungen an die Dokumentation und Darstellung der Ergebnisse der neu zu regelnden Brandsimulationen aufgestellt. Abschließend sind in diesem Dokument Anleitungen für eine Plausibilitätsbetrachtung angegeben.

Die Brandsimulationen kommen insbesondere dann zur Anwendung, 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 $t_{\text{ä}}$ und w ermittelt und deren Bedeutung für die weitere Normungsarbeit an DIN/TR 18230-4 untersucht.

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

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument gibt unter Verwendung von Modellgebäuden weiterführende Informationen für die Anwendung von Brandsimulationen zur Ermittlung von Brandauswirkungen (Temperaturverläufe im Raum und in den Bauteilen), die Grundlage des Berechnungsverfahrens von DIN 18230-1 sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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 4102-2, *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen — Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*

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

DIN 18009-1, *Brandschutzingenieurwesen — Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung*

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 EN 1991-1-2/NA, *Nationaler Anhang — National festgelegte Parameter — Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen — Brandeinwirkungen auf Tragwerke*

DIN EN 1992-1-1, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*

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*

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*

DIN V ENV 1992-1-2:1997-05¹, *Eurocode 2 — Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken — Teil 1-2: Allgemeine Regeln; Tragwerksbemessung für den Brandfall*

3 Begriffe und Symbole

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

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

¹ Zurückgezogen.

— DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>

— DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Äquivalenzverfahren

Bestimmung der äquivalenten Branddauer von Bauteilen auf der Grundlage eines Temperatur-Zeit-Verlaufes

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Bauteil wird auf Grundlage eines Bemessungsbrandes ermittelt und mit der ermittelten Bauteiltemperatur unter Normbrandbeanspruchung nach DIN 4102-2 oder alternativ nach DIN EN 1363-1 verglichen.

3.2

äquivalente Branddauer

t_a

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in Minuten (min). Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102-2 oder alternativ nach DIN EN 1363-1.

3.3

Bemessungsbrand

definierter Brandverlauf, der bei der Brandschutzbemessung zugrunde gelegt wird

3.4

Brandausbreitungsgeschwindigkeit

q

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in m/min.

3.5

Brandbelastung

q

auf die Brandfläche bezogene Brandlast

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in kWh/m².

3.6

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.

3.7

Brandleistung

$\dot{Q}$

in einem Brand erzeugte zeitabhängige Wärmeleistung

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in kW.

3.8

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.

3.9

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.

3.10

konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

α

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

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

3.11

Mehrraum-Zonen-Modell

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

3.12

Plume

oberhalb eines Feuers aufsteigender Rauchgasstrom sowie alle darin enthaltenen Partikel

[QUELLE: EN ISO 13943:2023, 3.162]

3.13

spezifische Abbrandrate

r

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in $kg/(m^2 h)$.

3.14

spezifische Brandleistung

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

Wärmefreisetzungsrate, bezogen auf die definierte Brandfläche

Anmerkung 1 zum Begriff: Angegeben in kW/m^2 .

3.15

stöchiometrischer Luftbedarf

r_{Luft}

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

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

3.16**Verbrennungseffektivität** χ

Verhältnis von verbrannter zu vorhandener Brandlast

3.17**Wärmeabzugsfaktor** w

dimensionsloser Beiwert, der die Wirkung der vorhandenen vertikalen und horizontalen Wärmeabzugsflächen auf die Temperaturentwicklung im betrachteten Bereich berücksichtigt

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe DIN 18230-1:2010-09, 3.13.

3.18**Wärmebilanzverfahren**

Bestimmung der Temperaturzeitkurven in Räumen durch Brandsimulation

4 Grundlagen**4.1 Vorgehensweise**

Das Verfahren der DIN 18230-1 dient der Bestimmung der äquivalenten Branddauer t_a . 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;
- Kontraktionsbeiwerte für alle Öffnungen (die Kontraktionsbeiwerte für alle Öffnungen wurden entweder im Zuge der Simulation berechnet oder mit 0,7 festgelegt. Die Kontraktionsbeiwerte der Öffnungen wurden dokumentiert.).

ANMERKUNG In DIN EN 12101-2:2017-08 werden die Beiwerte ermittelt und als Kontraktionskoeffizient bezeichnet.

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 verwendet.

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 die stöchiometrische Verbrennung $\phi = 1$.

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 $r_{\text{Luft}} = c_{\text{stöch}} H_{\text{u}}$. Dabei ist $c_{\text{stöch}}$ der stöchiometrische Luftbedarf je kWh Verbrennungsenergie. Als Rechenwert ist hier $c_{\text{stöch}} = 1,13 \text{ kg Luft/kWh}$ 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 Heißgas-schicht.

Bei der Verwendung von Feldmodellen wurden die Temperaturen in der jeweils 2. Zelle unter der Decke über der Brandfläche gemittelt. Dabei wurden entweder alle Zellen oder mindestens 25 gleichmäßig über die Brandfläche 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;

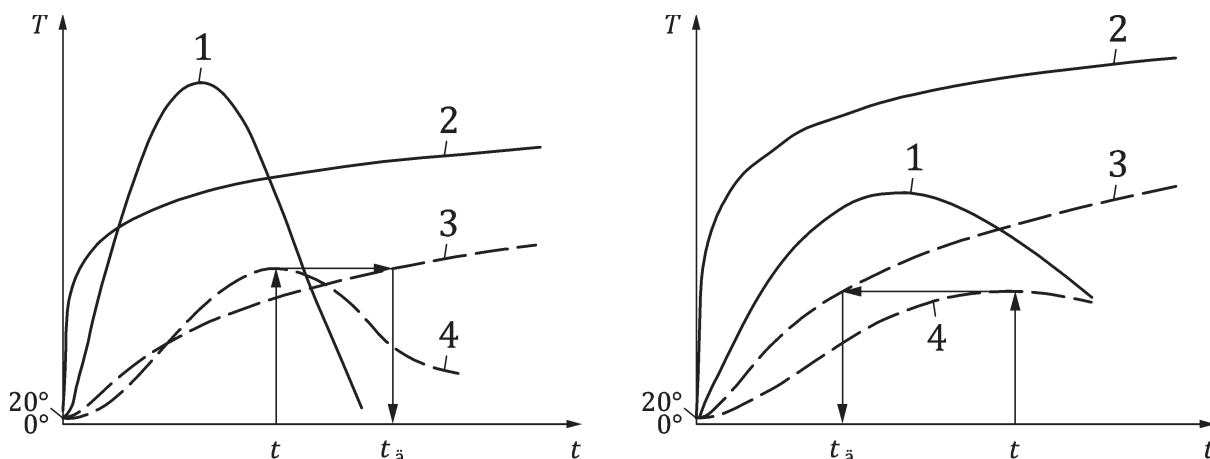
— die rechnerisch ermittelte Brandleistung (Wärmefreisetzung) unter Berücksichtigung des Brandregimes.

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 $t_{\bar{a}}$ 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
- $t_{\bar{a}}$ Zeit in Minuten (min), bei der im betrachteten Referenzbauteil im Normbrand (Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102-2) dieselbe Temperatur erreicht wird wie im Bemessungsbrand

Bild 1 — Definition der äquivalenten Branddauer $t_{\bar{a}}$ für ein Referenzbauteil, links: Temperaturen im Brandraum oberhalb der ETK, rechts: Temperaturen im Brandraum unterhalb der ETK

5 Auswirkungen unterschiedlicher Referenzbauteile

5.1 Vorgehensweise

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

5.2 Referenzbauteile

5.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der Studien wurde das DIN 18230-1 zugrundeliegende Referenzbauteil aus Beton ($d = 150$ mm) mit dem in diesem Dokument verwendeten Betonbauteil ($d = 200$ 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:

$\alpha_{0,150 \text{ mm}} = 1 - 0,002 \cdot (T - 20)$	$T < 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\alpha_{0,150 \text{ mm}} = 0,30$	$T < 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\alpha_{0,150 \text{ mm}} = 1 - 0,002 \cdot (T - 20)$	$T < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\alpha_{0,150 \text{ mm}} = 0,64 - 0,676 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 200)$	$T < 525 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\alpha_{0,150 \text{ mm}} = 0,42$	$T \geq 525 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\lambda_{0,150 \text{ mm}} = 1,745 \text{ W/m}\cdot\text{K} + 0,006 \text{ W/m}\cdot\text{K} \cdot (T - 20)$	$T < 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\lambda_{0,150 \text{ mm}} = 1,745 \text{ W/m}\cdot\text{K} - 0,000 \text{ W/m}\cdot\text{K} \cdot (T - 100)$	$T < 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$\lambda_{0,150 \text{ mm}} = 1,23$	$T \geq 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$

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

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

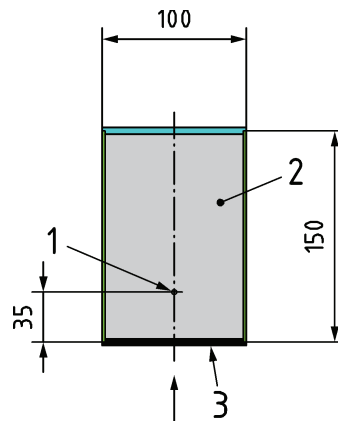
Dabei ist

$\alpha_{0,150 \text{ mm}}$ 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 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.



Legende

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

Bild 2 — Referenzbauteil Beton ($d = 150$ 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]):

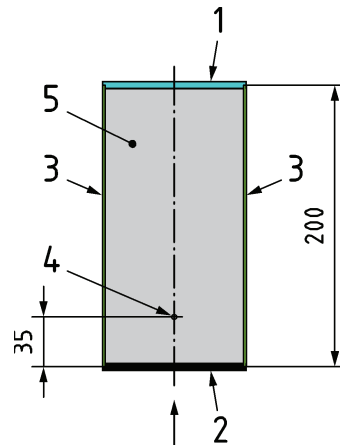
- Bauteildicke 150 mm;
- Referenztemperatur in 35 mm Bauteiltiefe;
- Ausgangstemperatur $T_0 = 20$ °C;
- Konvektion (heiße Seite) wird in MRFC wie folgt berechnet: $\alpha_i = 19,2 + 0,005\,83 \cdot T$ in $W/(m^2 \cdot K)$; hierbei wird eine konstante Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s zugrunde gelegt;
- Konvektion (kalte Seite) $\alpha_a = 5$ $W/(m^2 \cdot K)$;
- Emissionszahl Außenseite Referenzbauteil $\varepsilon_a = 0,8$;
- Emissionszahl Innenseite Referenzbauteil $\varepsilon_i = 0,4$.

5.2.3 Referenzbauteil Beton, $d = 200$ 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
- 5 Referenzbauteil

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 $^{\circ}\text{C}$;

F Betonfeuchte, Massenteil in %, Ansatz 2 %.

Dichte:

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

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

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

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

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

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

mit

ρ_{tr} Dichte des trockenen Betonmaterials, in kg/m^3 , Ansatz $2\,120\text{ kg/m}^3$;

T_c Betontemperatur, in $^{\circ}\text{C}$;

W Gesamtwassergehalt im Beton; in kg/m^3 , Ansatz 180 kg/m^3 .

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 $^{\circ}\text{C}$;

c spezifische Wärmekapazität in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

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

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

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

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

$\varepsilon_f = 0,7$ Emissionszahl der Flamme.

ANMERKUNG Diese Werte sind leicht abweichend von den Regelungen der Eurocode-Teile zur Bemessung im Brandfall 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 $20\text{ °C} \leq \theta_c < 600\text{ °C}$

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

— für $600\text{ °C} \leq \theta_c < 735\text{ °C}$

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

— für $735\text{ °C} \leq \theta_c < 900\text{ °C}$

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

— für $900\text{ °C} \leq \theta_c < 1\,200\text{ °C}$

$$c_a = 650$$

Wärmeleitfähigkeit:

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

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

— für $800\text{ °C} \leq \theta_a < 1\,200\text{ °C}$

$$\lambda_a = 27,3$$

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 unbekleidete (ungeschützte) als auch für bekleidete (geschützte) Stahlbauteile.

Bei der Berechnung ist der Profilkfaktor 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 Profilkfaktors A_p/V für allseitige und dreiseitige Brandbeanspruchung angegeben. Dabei wird durch die rote Umrandung in profilfolgend bzw. kastenförmig beflamnte Stahlquerschnitte unterschieden. Das Verhältnis A_p/V nach DIN EN 1993-1-2 entspricht dem aus der Praxis bekannten Verhältnis U/A nach DIN 4102-4.

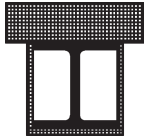
Brandbeanspruchung	dreiseitig		allseitig/vierseitig	
Art der Bekleidung	profilfolgend	kastenförmig	profilfolgend	kastenförmig
				
Profilfaktor $A_p/V =$	$\frac{\text{Mantelfläche}-b}{A}$	$\frac{2h+b}{A}$	$\frac{\text{Mantelfläche}}{A}$	$\frac{2h+2b}{A}$

Bild 4 — Ermittlung des Profilfaktors für Stahlbauteile unter allseitiger und dreiseitiger Brandbeanspruchung für profilfolgende und kastenförmige Bekleidung aus [9]

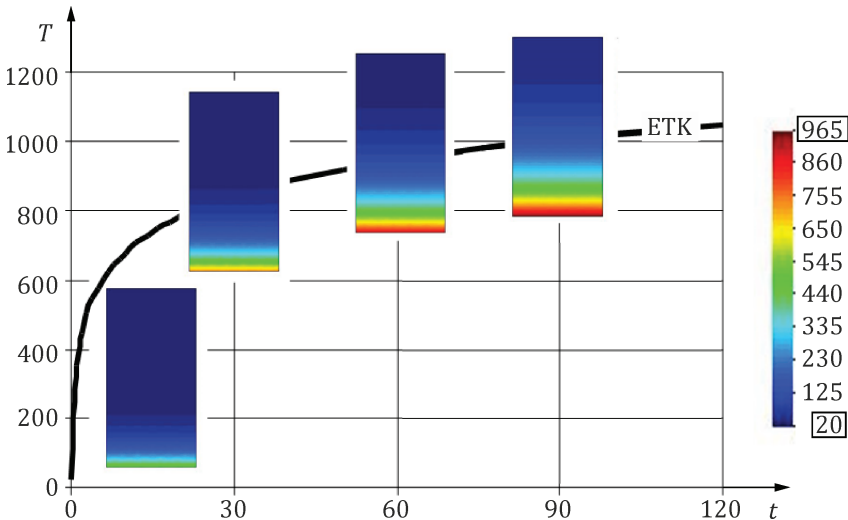
In der Praxis werden im Hochbau und im Industriebau i. d. R. Stahlprofile eingesetzt, die als sogenannte Walzprofile bezeichnet werden. Es handelt sich um I-Profile und um HE-Profile. Die Stahlprofile sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 mit ihrem Profilfaktor in Abhängigkeit der Brandbeanspruchung zusammengestellt (3: dreiseitige Brandbeanspruchung; 4: allseitig/vierseitige Brandbeanspruchung).

Stahlbauteile besitzen in der Praxis Profilfaktoren zwischen 50 m^{-1} und 400 m^{-1} , z. B. [9].

5.3 Vergleichsrechnungen

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

Bild 5 enthält berechnete Temperaturverteilungen für das Referenzbauteil nach 15 min, 30 min, 60 min und 90 min. Bei Betonbauteilen ist die Temperatur aufgrund der thermischen Materialkennwerte und größeren Querschnitte ungleichförmig verteilt. Daher ist die Lage des Referenzpunktes wichtig. Dieser liegt bei 35 mm Bauteiltiefe und somit etwa im Bereich der äußeren Bewehrungslage [17].



Legende

T in $^{\circ}\text{C}$
 t in min

Bild 5 — Berechnete Temperaturverteilungen nach 15 min, 30 min, 60 min und 90 min bei Beanspruchung nach Einheit-Temperaturzeitkurve (ETK) (DIN 4102-2)

5.3.2 Referenzbauteil Stahl

In der Praxis werden in der Regel Stahlbauteile, die sich hinsichtlich der thermischen Materialkennwerte und üblichen Querschnitte nicht mit dem Referenzbauteil aus Beton ($d = 200 \text{ mm}$) vergleichen lassen für das Tragwerk der Industriebauten eingesetzt. Somit stellt sich die Frage, ob das Referenzbauteil aus Beton für die Bemessung von Stahlbauteilen geeignet ist.

Bild 6 enthält berechnete Stahltemperaturen unter einer Brandbeanspruchung nach der Einheit-Temperaturzeitkurve (Normbrand). Die Berechnungen erfolgten auf der Grundlage von DIN EN 1993-1-2 für ein Stahlprofil HEB 240 und ein Blech. Stahlträger und Blech besitzen den gleichen Profilfaktor von 131 m^{-1} .

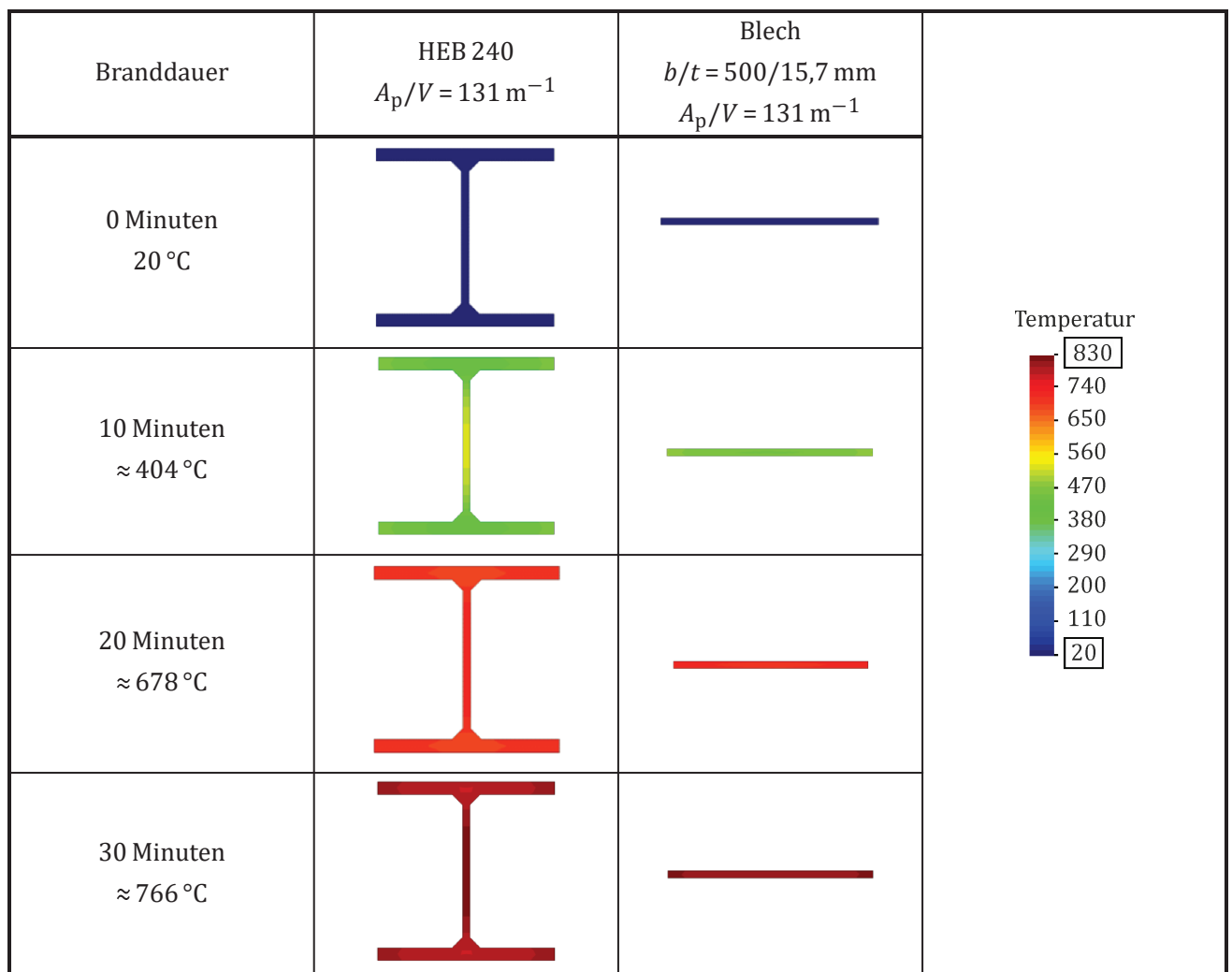
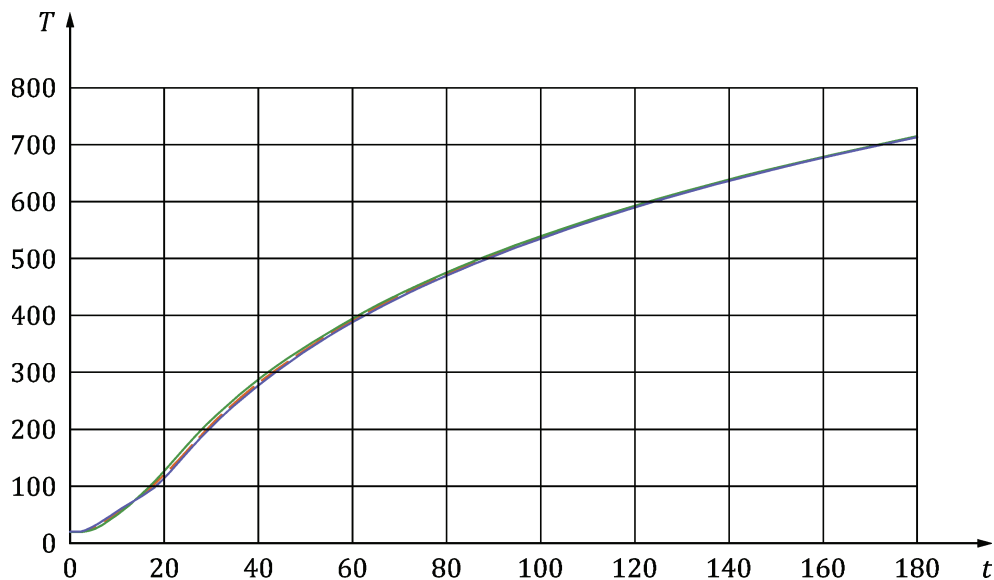


Bild 6 — Berechnete Temperaturen nach einer vierseitigen Brandbeanspruchung nach der Einheit-Temperaturzeitkurve für einen Stahlträger und ein Blech mit einem Profilfaktor $A_p/V = 131 \text{ m}^{-1}$

Die berechneten Temperaturen sind über den Querschnitt nahezu gleichförmig verteilt, sie schwanken lediglich um 20 K. Somit ist die Schlussfolgerung zulässig, dass Träger und Blech die gleichen Temperaturen bei gleichem Profilfaktor bei vierseitiger Brandbeanspruchung besitzen. Die weiteren Berechnungen werden somit im Folgenden der Einfachheit halber nur für Bleche mit konstanten Profilfaktoren durchgeführt. Es werden Profilfaktoren zwischen $A_p/V = 50 \text{ m}^{-1}$ und $A_p/V = 400 \text{ m}^{-1}$ gewählt, da dies der praxisrelevante Bereich ist.

5.3.3 Temperaturberechnungen mit verschiedenen Programmen

Für das Referenzbauteil Beton ($d = 200 \text{ mm}$) wurden mit den Programmen (ANSYS [1], COMSOL [2], STABA-F [8], BoFire [10], BRTemp2D [16]) Berechnungen der Bauteiltemperaturen durchgeführt. Die Studien zeigten, dass die berechneten Temperaturverteilungen im Referenzbauteil bei Verwendung verschiedener Programme zu lediglich marginal unterschiedlichen Ergebnissen führen (siehe Bild 7). Somit kann für die Berechnung der Bauteiltemperatur und die Berechnung der äquivalenten Branddauer jedes der oben aufgeführten Programme verwendet werden.



Legende

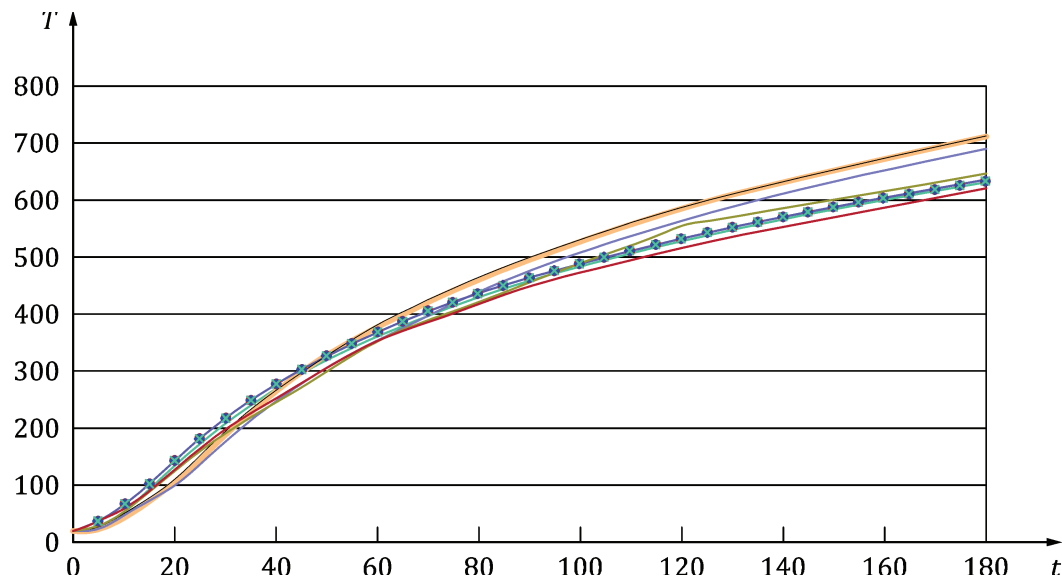
- T in °C
 t in min
 — ANSYS
 — COSMOL
 — DIN/TR 18230-4, berechnet mit BRTemp2D

Bild 7 — Berechnete Temperaturentwicklungen unter Normbrandbeanspruchung im Referenzbauteil in der definierten Referenzposition mit verschiedenen Simulationsprogrammen für die Materialgesetze des Referenzbauteils $d = 200 \text{ mm}$

Im Zuge der Entwicklung von DIN EN 1992-1-2 für die Brandbemessung wurden abweichende thermische Materialkennwerte verwendet. Hier sind zu nennen:

- DIN V ENV 1992-1-2:1997-05 (zurückgezogen);
- DIN EN 1992-1-2:2010-12.

Darüber hinaus werden die thermischen Materialkennwerte aus 5.2.2 und 5.2.3 verglichen. Die Einflüsse auf die Bauteiltemperatur sind in Bild 8 dargestellt.



Legende

T in °C

t in min

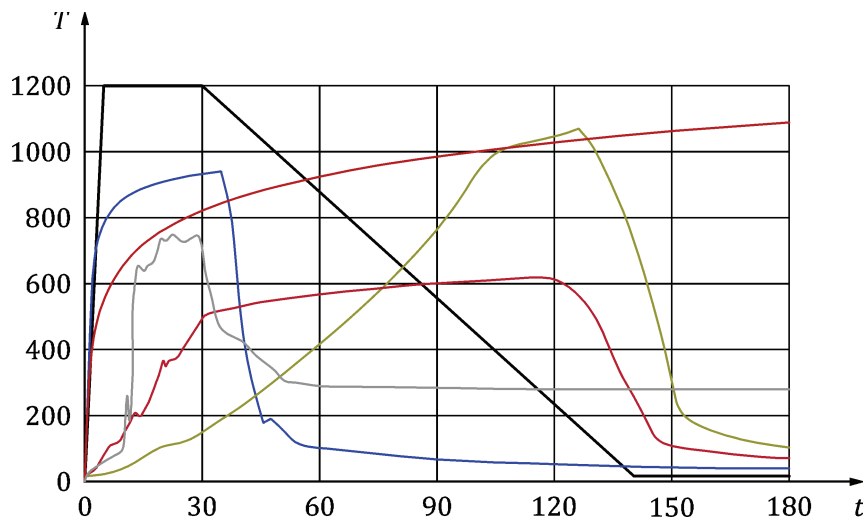
- Berechnung nach [8] mit Werkstoffkennwerten nach DIN EN 1992-1-2/NA
- Berechnung nach [1] mit Werkstoffkennwerten nach DIN EN 1992-1-2
- Berechnung nach [12]
- Berechnung nach [8] mit Werkstoffkennwerten nach DIN EN 1992-1-2
- Berechnung nach [10] mit Werkstoffkennwerten nach DIN EN 1992-1-2/NA
- Berechnung nach [2] mit Werkstoffkennwerten nach [12]
- x— Berechnung nach [1] mit Werkstoffkennwerten nach DIN EN 1992-1-2/NA
- Berechnung nach [10] mit Werkstoffkennwerten nach DIN EN 1992-1-1
- Berechnung nach [1] mit Werkstoffkennwerten nach [12]

Bild 8 — Berechnete Temperaturentwicklungen unter Normbrandbeanspruchung im Referenzbauteil in der definierten Referenzposition mit verschiedenen Materialgesetzen

Die Berücksichtigung der verschiedenen thermischen Materialkennwerte für das Referenzbauteil aus Beton führt zu ähnlichen Temperaturentwicklungen. Da sowohl für Naturbrand- als auch Normbrandbeanspruchung die gleichen thermischen Materialeigenschaften des Referenzbauteils zu verwenden sind, ist der Einfluss auf die äquivalente Branddauer vernachlässigbar.

5.3.4 Einfluss des Temperaturverlaufs auf die äquivalente Branddauer

Für die Berechnung von $t_{\ddot{a}}$ ist ein Bemessungsbrand in DIN 18230-1 festgelegt. Zur Abschätzung der Robustheit des Berechnungsverfahrens wurden im Rahmen einer Parameterstudie auch andere Brandverläufe untersucht (siehe Bild 9). Diese weisen unterschiedliche Maximaltemperaturen und Branddauern auf. Die verwendeten Temperaturzeitkurven decken einen praxisrelevanten Bereich ab.



Legende

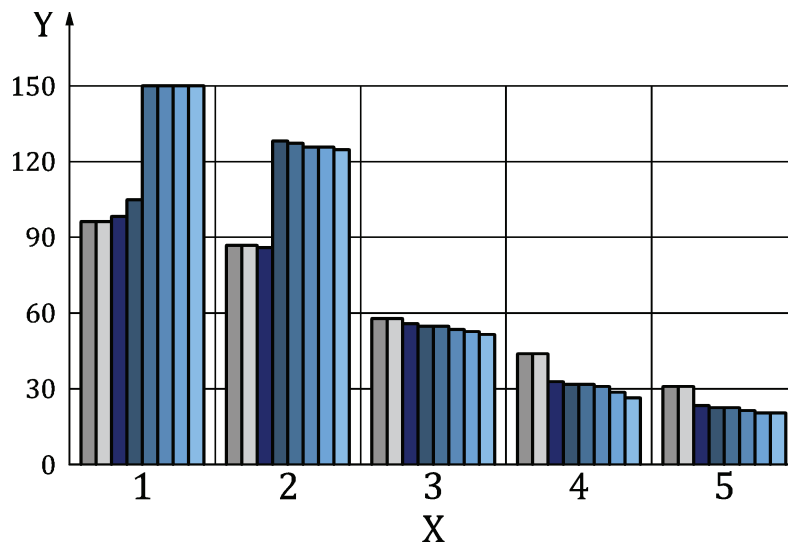
- T in °C
 t in min
 — Temperaturen nach ZTV-ING [19]
 — Kerosin-Brand²
 — LKW-Brand [18]
 — Temperaturen nach Einheit-Temperaturzeitkurve (TETK)
 — Bürobrand nach DIN EN 1991-1-2/NA
 — Brand nach DIN 18230-1

Bild 9 — Beispiele für Temperaturzeitkurven

Mit Ausnahme der Temperaturzeitkurven nach ZTV-ING und der ETK wurden die Temperaturzeitkurven basierend auf unterschiedlichen Brandszenarien für eine Referenzhalle mit einer Größe von 2 400 m² (40 m × 60 m) und einer Höhe von 6 m Höhe (entsprechend w -Faktor-Neuberechnung 1990) mit einem Zonenmodell berechnet. Die Temperaturzeitkurven entsprechen den Gastemperaturen in der Heißgasschicht.

Bild 10 beinhaltet berechnete äquivalente Branddauern für verschiedene Bauteile. Zum einen wurde das Referenzbauteil aus Beton ($d = 200$ mm) verwendet, zum anderen wurden Stahlbauteile gewählt, die den Anwendungsbereich von Stahltragwerken im Industriebau repräsentieren sollen. Diese Stahlbauteile werden durch den Profilmfaktor A/V nach DIN EN 1993-1-2 charakterisiert. Der Profilmfaktor U/A liegt für übliche Stahlprofile im Hochbau zwischen 50 m⁻¹ und 400 m⁻¹. Weiterhin wurde eine Stahlplatte mit 20 cm Dicke unter einseitiger Brandbeanspruchung zum Vergleich betrachtet. Abweichend zu den Stahlprofilen wurde hierbei auch die Temperaturverteilung berücksichtigt. Für die Auswertung wurde die Temperatur in einer Bauteiltiefe von 5 mm herangezogen [6].

² Brandszenario: 6 000 l Kerosin auf 30 m²



Legende

- Betonbauteil nach 5.2.3
- Betonbauteil nach 5.2.2 (bzw. DIN 18230-1)
- Stahlplatte
- Stahlprofil $U/A = 50/m$
- Stahlprofil $U/A = 100/m$
- Stahlprofil $U/A = 200/m$
- Stahlprofil $U/A = 300/m$
- Stahlprofil $U/A = 400/m$
- X Bemessungsbrände
- Y äquivalente Branddauer in min
- 1 ZTV-ING
- 2 DIN EN 1991-1-2
- 3 Kerosin
- 4 DIN 18230-1
- 5 LKW

Bild 10 — Berechnete äquivalente Branddauern t_a für die Bemessungsbrände aus Bild 9 für die Referenzbauteile aus Beton und Stahl

Bild 10 ist zu entnehmen, dass die berechneten äquivalenten Branddauern für einen Bemessungsbrand bei allen Stahlprofilen in etwa in der gleichen Größenordnung liegen. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Stahlbauteil schlank (großes U/A) oder gedungen (kleines U/A) ist. Bis zu äquivalenten Branddauern von etwa 60 min liegen die Werte für die Referenzbauteile aus Beton und die massive Stahlplatte über denen für die schlanken Stahlbauteile.

5.4 Schlussfolgerung

Sowohl die Referenzbauteile aus Beton als auch aus Stahl sind geeignet für die Bestimmung der äquivalenten Branddauer für Tragwerke aus Beton und Stahl.

Bei der Untersuchung der Wirkungen der angesetzten Temperatur-Zeitkurven auf die Referenzbauteile zeigt sich, dass die t_a -Werte bei Brandraumtemperaturen bis etwa 900 °C unabhängig von der Einwirkungsdauer auf der sicheren Seite liegen.

Für die hier untersuchten Temperaturzeitkurven mit Maximal-Temperaturen über 900 °C zeigt sich, dass die t_a -Werte unter Zugrundelegung eines Referenzbauteils aus Beton im Vergleich mit den untersuchten Stahlbauteilen auf der unsicheren Seite liegen können.

6 Anwendungsbeispiele

6.1 Vorgehensweise

Zum Vergleich von zwei Simulationsprogrammen, die heute in der Anwendung zu finden sind, wurden drei in ihrer Grundfläche unterschiedliche eingeschossige Modellgebäude untersucht und als Rechenbeispiele aufbereitet. Diese können vom Anwender auch als Übungsbeispiele verwendet werden.

Die untersuchte kleine Halle mit einer Grundfläche von 400 m^2 (siehe 6.2) stellt die Grenze zu den Regelungen des Eurocode 1 (DIN EN 1991-1-2) dar.

Die mittlere Halle mit einer Grundfläche von $1\,600 \text{ m}^2$ (siehe 6.3) stellt annähernd den kleinsten Brandabschnitt (Vorgaben hierzu enthält MIndBauRL [5]), Abschnitt 6 dar, der ohne besondere Anforderungen an den Feuerwiderstand der tragenden Konstruktion ausgebildet werden kann (Vorgaben hierzu enthält MIndBauRL [5], Abschnitt 6, $1\,800 \text{ m}^2$).

Die Halle mit einer Grundfläche von $2\,400 \text{ m}^2$ (siehe 6.4) liegt DIN 18230-1 als Referenzhalle zu Grunde. Diese Halle wurde im Forschungsbericht der Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit (AGB) aus dem Jahr 1990 [13] untersucht und war Grundlage für die Überarbeitung des Rechenverfahrens nach DIN 18230-1 aus dem Jahr 1998.

Die verwendeten Bemessungsbrandszenarien sind in 6.2 für die kleine Halle, in 6.3 für die mittlere Halle und in 6.4 für die Referenzhalle nach DIN 18230-1 aufgeführt.

Bei den nachfolgenden Berechnungen wurden die Simulationsprogramme Fire Dynamics Simulator (FDS) in der Version 5.5.3 [7] und Version 6.5.3, sowie Multi-Room-Fire-Code (MRFC) in der Version 3.3.5 [6] und 5.1 [26] verwendet.

Zur Berechnung der Bauteiltemperatur im Referenzbauteil wird das Programm BRTemp2D [16] verwendet.

Die verwendeten Programme sind zum Zeitpunkt ihrer Verwendung verifiziert und validiert.

Für das Simulationsprogramm FDS ist der jeweilige Nachweis für Verifizierung und Validierung der Literatur [20] zu entnehmen. Für MRFC sind diese Informationen in [21], [22] und [23] zu finden.

6.2 Kleine Halle (400 m^2)

6.2.1 Spezifikation

6.2.1.1 Aufgabenstellung

Das Berechnungsbeispiel dient der Identifikation ergebnisrelevanter Parameter am Beispiel der Simulationsprogramme FDS und MRFC, FIGARO, CFAST. Untersuchungsgegenstand ist die Bestimmung der äquivalenten Branddauer in einer kleinen eingeschossigen Halle mit einer Grundfläche von 400 m^2 bei einem vordefinierten Brandszenario.

6.2.1.2 Eingangsdaten und Randbedingungen

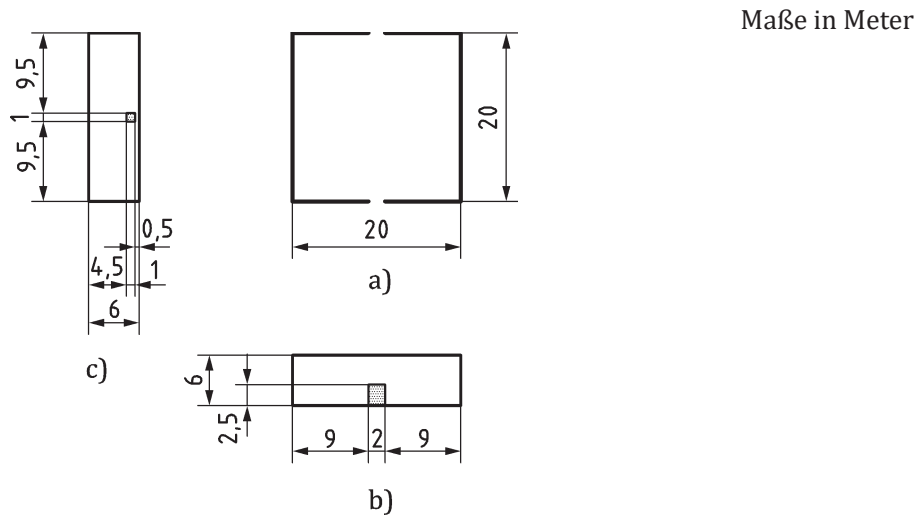
Eine Übersicht der allgemeinen Eingangsdaten und Randbedingungen ist 4.2 zu entnehmen. Die konkreten Annahmen werden im Nachfolgenden beschrieben.

Untersuchungsgegenstand ist eine kleine Halle mit einer Grundfläche von 400 m^2 und einer lichten Höhe von 6 m. Die lichte Breite und Länge des Innenraumes betragen 20 m.

Als Ventilationsflächen stehen Fensteröffnungen mit einer Gesamtfläche von 2 m^2 und zwei gegenüberliegende Tore mit einer Gesamtfläche von 10 m^2 zur Verfügung. Es werden keine horizontalen Öffnungen angesetzt.

Die Tore sind mittig in zwei Seitenwänden angeordnet und weisen jeweils eine Breite von 2 m und eine Höhe von 2,5 m auf. Die Fensteröffnungen mit einer Öffnungsfläche von je 1 m² (1 m × 1 m) sind mittig in den nicht mit Toren versehenen Seitenwänden angeordnet. Die Unterkante der Fensteröffnungen liegt 4,5 m über der Oberkante des Hallenbodens (siehe Bild 11).

Alle Öffnungen werden von Brandbeginn an als geöffnet angenommen. Für die Berechnung mit dem Mehrraum-Zonenmodell MRFC wird ein Kontraktionsbeiwert von 0,7 angenommen. Bei der Berechnung mit dem Feldmodell FDS wird die geometrische Öffnungsfläche für die Tore bzw. Fenster angesetzt.



Legende

- a) Aufsicht
- b) Seitenansicht 1
- c) Seitenansicht 2

Bild 11 — Schematische Darstellung der Halle geometrie (400 m²)

Für die betrachtete Halle wird angenommen, dass der Boden, die Wände und die Decke jeweils aus dem Bau- stoff Beton bestehen. Die Umfassungsbauteile weisen eine Dicke von 0,3 m auf. Als Materialkennwerte wurden die in 5.2.3 (Referenzbauteil $d = 200\text{ mm}$) beschriebenen Werte verwendet.

Für die Umgebung wird als konstante Randbedingung eine Umgebungstemperatur von 20 °C (293,15 K) bei einem Umgebungsluftdruck von 101 325 Pa angenommen.

6.2.1.3 Bemessungsbrand

Als Bemessungsbrand wird ein von der Hallenmitte gleichmäßig in alle vier Raumrichtungen sich ausbreiten- der Brand angenommen.

Dem Bemessungsbrand liegt eine spezifische Brandlast von 48 kWh/m² (172,8 MJ/m²) bei einem spezifischen Heizwert von 4,8 kWh/kg (17 280 kJ/kg) und einer spezifischen Brandmasse von 10 kg/m² zugrunde.

Bei den Berechnungen werden die folgenden Daten für den Brennstoff verwendet. Damit die Berechnungen mit den verschiedenen Modellen vergleichbar bleiben, werden bei der Berechnung die Werte der nachfolgenden Tabelle 1 berücksichtigt.

Tabelle 1 — Chemische und Thermophysikalische Daten zum Brennstoff

Kohlenstoffanteil	44 (% Massenanteil)
Wasserstoffanteil	6 (% Massenanteil)

Tabelle 1 (*fortgesetzt*)

Sauerstoffanteil	50 (% Massenanteil)
Wasseranteil	0,0 (% Massenanteil)
Heizwert	17 280 kJ/kg (4,8 kWh/kg)

Unter der Annahme einer konstanten spezifischen Abbrandrate von $30 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$ beträgt die spezifische Brandleistung (Wärmefreisetzung) $144 \text{ kW}/\text{m}^2$ ($4,8 \text{ kWh}/\text{kg} \times 30 \text{ kg m}^2/\text{h} = 144 \text{ kW}/\text{m}^2$).

Die Brandausbreitung wird horizontal mit einer konstanten Geschwindigkeit von $1,0 \text{ m}/\text{min}$ angenommen. Die Branddauer ergibt sich aus der vorhandenen spezifischen Brandlast und der angegebenen spezifischen Abbrandrate.

6.2.1.4 Auswertung

Die Auswertung erfolgt nach den Randbedingungen in 4.4.

Bei der Berechnung mit dem Feldmodell werden die Gastemperaturen in der zweiten Zelle unter der Decke über die gesamte Fläche des Brandraumes ermittelt und gemittelt.

6.2.2 Modellbildung für ein Mehrraum-Zonenmodell

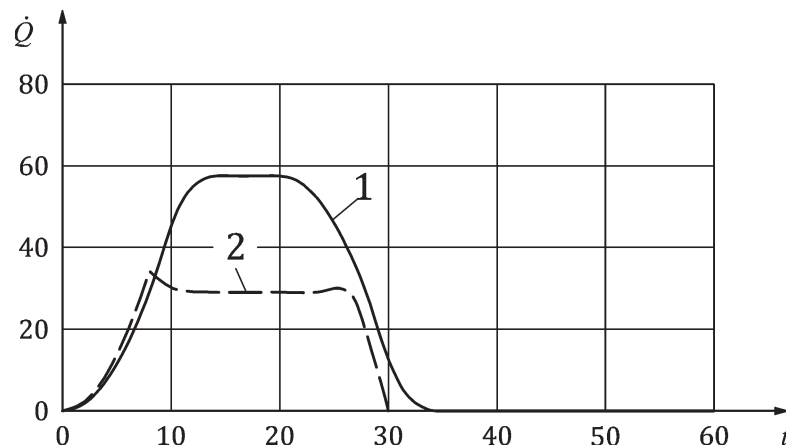
Im Brandsimulationsmodell MRFC sind für eine Reihe gängiger Stoffe thermodynamische Kennwerte im Programm implementiert. Diese Stoffwerte werden über die Simulationsdauer für jede Schicht abhängig von der tatsächlich vorliegenden Temperatur berücksichtigt. Im verwendeten Programm wird der implementierte Stoff „Normalbeton“ nach [4] für die temperaturabhängigen Materialgesetze der Umfassungsbauteile verwendet. Der Berechnung liegt ein quadratisches Ausbreitungsmodell zugrunde.

Des Weiteren ist zur Bestimmung der äquivalenten Branddauer beim Zonenmodell ein Plumemodell zu bestimmen. Für die Untersuchung der 400 m^2 -Halle wurde die kombinierte Plumeformel nach Zukoski mit virtuellem Ursprung mit Übergang zu Thomas und Hinkley verwendet. Die Strahlungsverluste am Plume wurden mit 20 % angesetzt.

In der Eingabemaske muss zur Beschreibung des Brennstoffes die chemische Zusammensetzung angegeben werden. Dazu sind die genauen Massenanteile (in %) der Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Sauerstoff-, Stickstoff- und Wasseranteile anzugeben (siehe Tabelle 1). Mit diesen Werten errechnet sich das Programm den stöchiometrischen Luftbedarf r_{Luft} .

6.2.3 Ergebnisse der Simulation

a) Brandleistung (Wärmefreisetzung)



Legende

$\dot{Q}$ Wärmefreisetzung in MW

t in min

1 Wärmefreisetzung des Bemessungsbrandes nach 4.3.1 (geometrisches Ausbreitungsmodell)

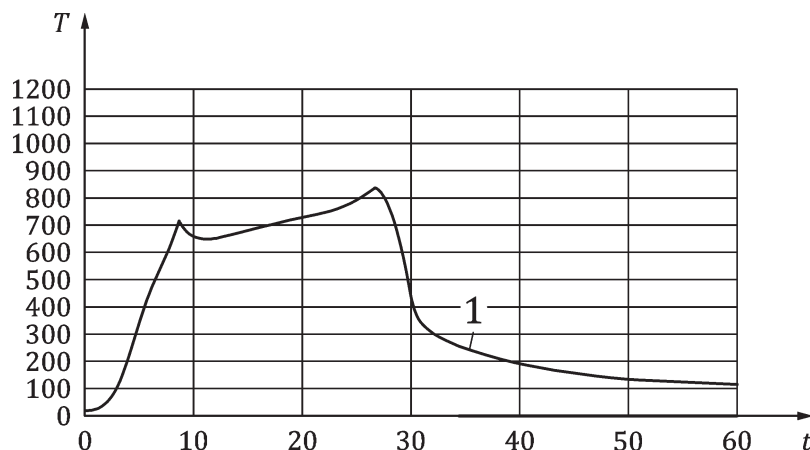
2 Rechnerisch ermittelte Wärmefreisetzung unter Berücksichtigung des Brandregimes (Simulation)

Bild 12 — Zeitlicher Verlauf der Brandleistung (Wärmefreisetzung) im Brandraum (MRFC 400 m²)

Die Brandleistung (Wärmefreisetzung) des Bemessungsbrandes nach 4.3.1 basiert auf einer kreisförmigen (radialen) Brandausbreitung (siehe Bild 12, Punkt 1). Die berechnete Brandleistung (Wärmefreisetzung) in der Simulation ist im Brandraum für den untersuchten Fall deutlich geringer (ventilationsgesteuerter Brand).

b) Temperatur

Der zeitliche Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum ist Bild 13 zu entnehmen.



Legende

T in °C

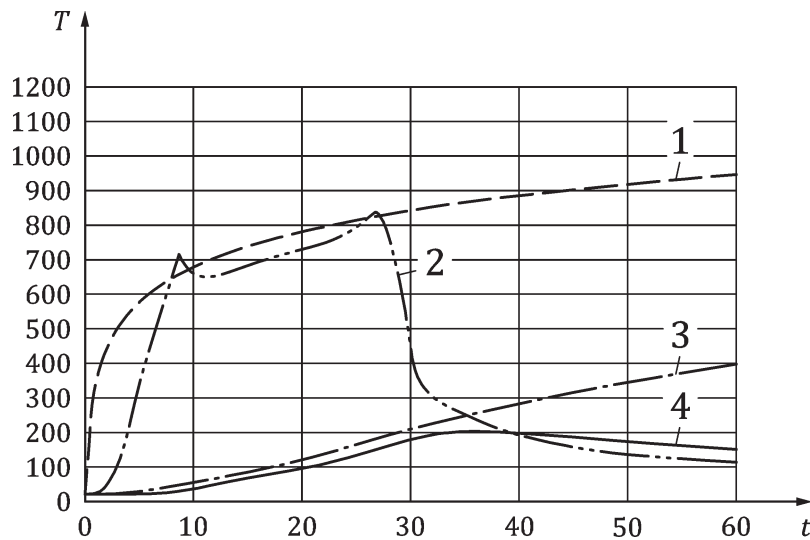
t in min

1 Temperaturen im Brandraum unter Bemessungsbrandbeanspruchung ($T_{\text{Bemessungsbrand}}$)

Bild 13 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (MRFC 400 m²)

c) Bauteiltemperatur im Referenzbauteil $d = 200$ /äquivalente Branddauer

Die sich aus der ermittelten Heißgastemperatur ergebende Bauteiltemperatur im Referenzbauteil, die ETK und die aus der ETK-Belastung resultierende Bauteiltemperatur sind in Bild 14 dargestellt.



Legende

T in °C

t in min

1 Gastemperatur nach ETK

2 Gastemperatur aus der Simulation

3 Bauteiltemperatur bei ETK

4 Bauteiltemperatur aus der Simulation

Bild 14 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (MRFC 400 m²)

Für das betrachtete Brandszenario ergibt sich eine äquivalente Branddauer von $t_{\text{ä}} = 29$ min.

6.2.4 Simulationsergebnisse mit dem Zonenmodell FIGARO

6.2.4.1 Modellbildung

Bei der nachfolgenden Auswertung wurde für die Berechnung das Simulationsprogramm FIGARO 2 [24] (Fire and Gas Spread in Rooms) in der Version 2.0 vom 31.10.2015 verwendet.

Im Simulationsprogramm FIGARO 2 wird Normalbeton mit nachfolgenden Stoffdaten verwendet:

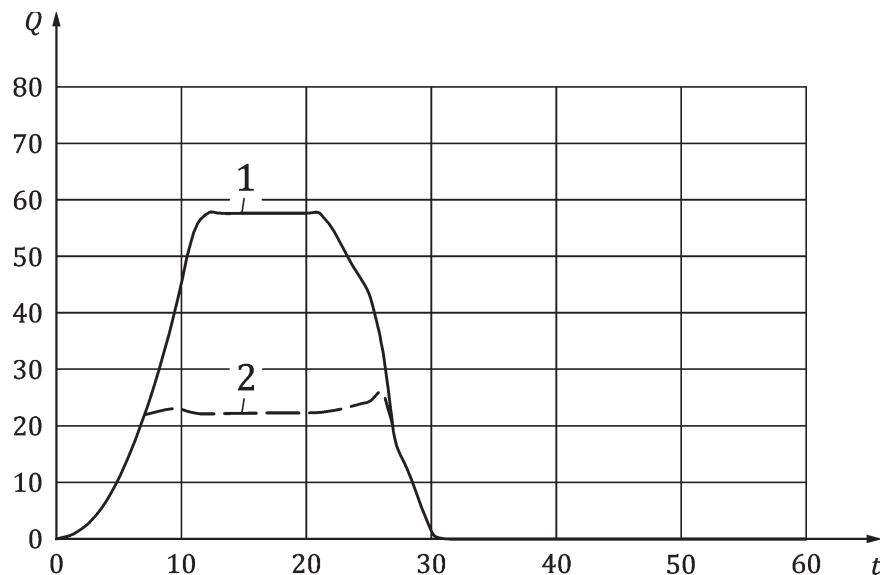
- Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 1,0 \text{ W/(m K)}$
- Wärmekapazität: $c = 1,0 \text{ kJ/(kg K)}$
- Dichte: $\rho = 2\,200 \text{ kg/m}^3$
- Materialstärke: $d = 0,3 \text{ m}$
- Emissionskoeffizient: $\varepsilon = 0,9$

Der Berechnung liegt ein quadratisches Ausbreitungsmodell zugrunde. Für die Berechnung wurde das Plume-Modell nach [25] verwendet.

6.2.4.2 Ergebnisse der Simulation

a) Brandleistung (Wärmefreisetzung)

Die vorgegebene Brandleistung Q (Wärmefreisetzung) des Bemessungsbrandes nach 4.3.1 basiert auf einer quadratischen Brandausbreitung (siehe Bild 15) und ist als P_{soll} (entspr. Kurve 1) dargestellt. Die unter Berücksichtigung der Ventilation φ berechnete Brandleistung P_{ist} (entspr. Kurve 2) ist wegen der relativ kleinen Öffnungen für den untersuchten Fall deutlich geringer (ventilationsgesteuerter Brand: $\varphi > 1$).



Legende

$\dot{Q}$ Wärmefreisetzung in MW

t in min

1 Wärmefreisetzung des Bemessungsbrandes nach 4.3.1 (geometrisches Ausbreitungsmodell)

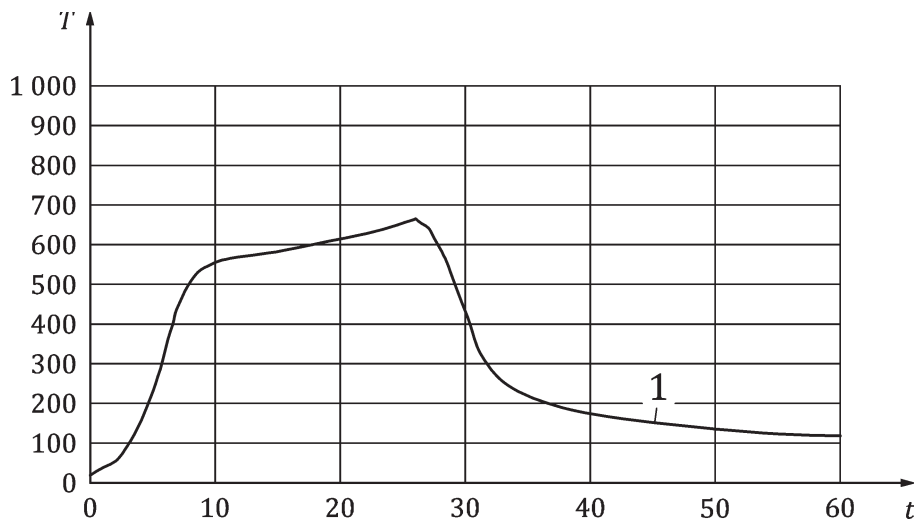
2 Rechnerisch ermittelte Wärmefreisetzung unter Berücksichtigung des Brandregimes (Simulation)

Bild 15 — Zeitlicher Verlauf der Brandleistung (Wärmefreisetzung) im Brandraum (FIGARO 400 m²)

Die Brandleistung (Wärmefreisetzung) des Bemessungsbrandes nach 4.3.1 basiert auf einer kreisförmigen (radialen) Brandausbreitung (siehe Bild 12, Punkt 1). Die berechnete Brandleistung (Wärmefreisetzung) in der Simulation ist im Brandraum für den untersuchten Fall deutlich geringer (ventilationsgesteuerter Brand).

b) Temperatur

Bild 16 zeigt die mittlere Temperatur in der Heißgasschicht in Abhängigkeit von der Branddauer.



Legende

T in °C

t in min

1 Temperaturen im Brandraum unter Bemessungsbrandbeanspruchung ($T_{\text{Bemessungsbrand}}$)

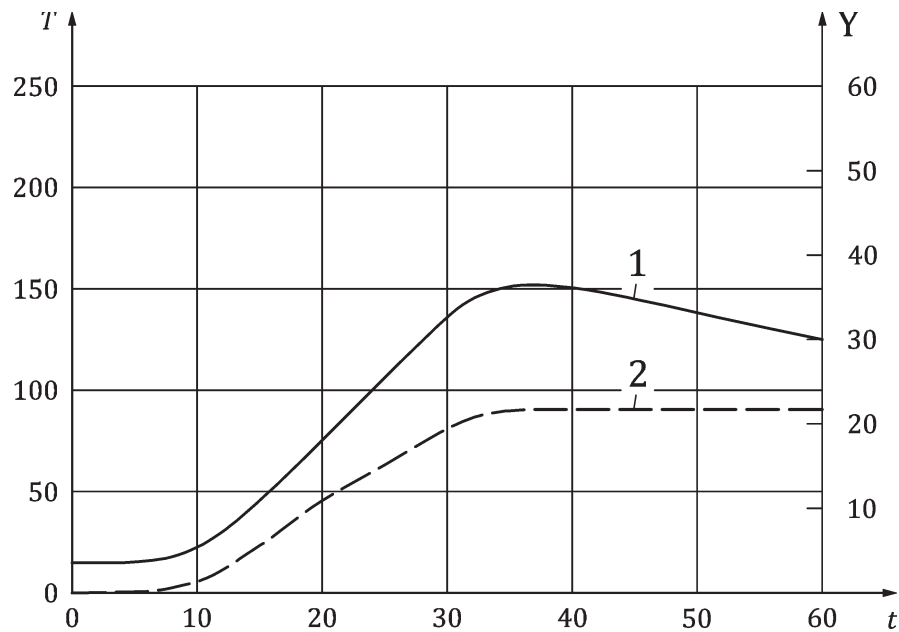
Bild 16 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (FIGARO 400 m²)

c) Bauteiltemperatur im Referenzbauteil $d = 200$ /äquivalente Branddauer

Aus der Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion resultiert der nachfolgend gezeigte Temperaturverlauf in einem Referenzbauteil (Betonplatte) in der Heißgasschicht unter der Decke des Brandraumes. Gezeigt ist die in der Simulation berechnete Temperatur in einer Tiefe von 35 mm (von der Belastungsseite gemessen).

Aus dem Abgleich der berechneten Temperaturen mit denen, wie sie sich bei einer Brandbeanspruchung nach der Einheit-Temperaturkurve (ETK) nach DIN 4102-2 einstellen, ergibt sich schließlich die äquivalente Branddauer $t_{\text{äq}}$.

Die sich aus der ermittelten Heißgastemperatur ergebende Bauteiltemperatur im Referenzbauteil, die ETK und die aus der ETK-Beanspruchung resultierende Bauteiltemperatur sind in Bild 17 dargestellt.



Legende

T in °C

t in min

1 Gastemperatur aus der Simulation

2 Bauteiltemperatur aus der Simulation

Bild 17 — Zeitlicher Verlauf der Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil (FIGARO 400 m²)

Für das betrachtete Brandszenario ergibt sich eine äquivalente Branddauer von $t_{\text{äq}} = 22$ min bei einer maximalen Temperatur von 152 °C im Referenzbauteil.

6.2.5 Simulationsergebnisse mit dem Zonenmodell CFAST

6.2.5.1 Modellbildung

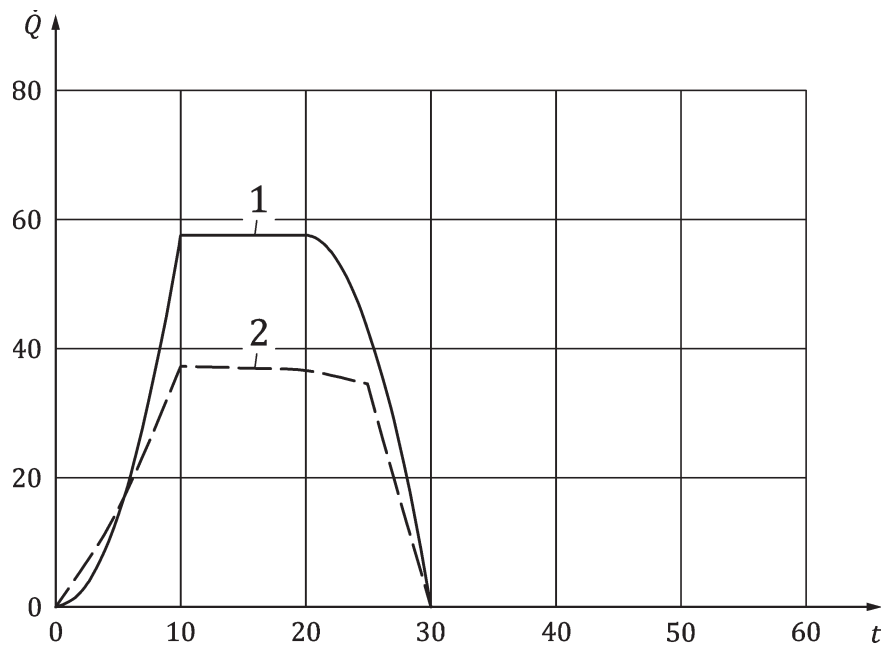
Bei der nachfolgenden Auswertung wurde für die Berechnung das Simulationsprogramm CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport) in der Version 6.3.0 vom 11.06.2012 verwendet.

Im Simulationsprogramm CFAST werden die Stoffdaten nach 6.2.1.2 verwendet.

Der Berechnung liegt ein quadratisches Ausbreitungsmodell zugrunde. Für die Berechnung wurde das Plume-modell nach [27] verwendet.

6.2.5.2 Ergebnisse der Simulation

a) Brandleistung (Wärmefreisetzung)



Legende

$\dot{Q}$ Wärmefreisetzung in MW

t in min

1 Wärmefreisetzung des Bemessungsbrandes nach 4.3.1 (geometrisches Ausbreitungsmodell)

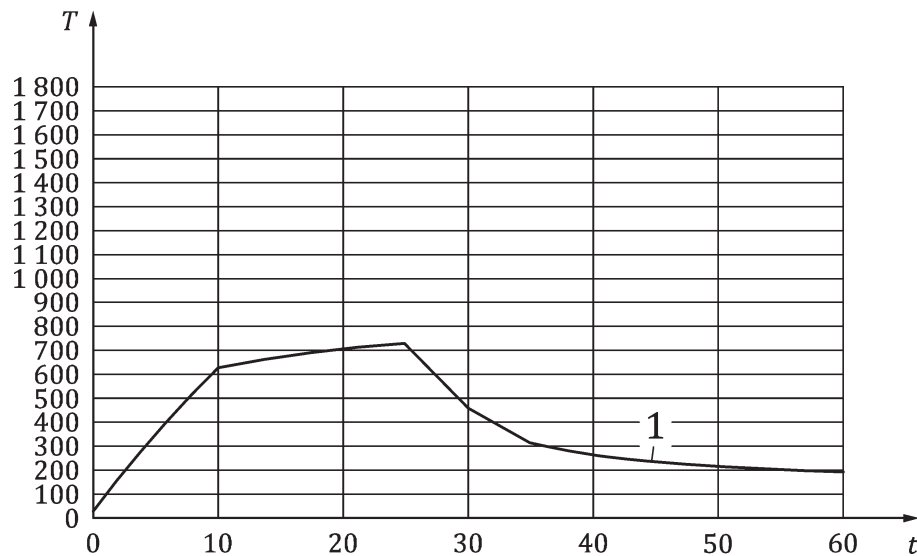
2 Rechnerisch ermittelte Wärmefreisetzung unter Berücksichtigung des Brandregimes (Simulation)

Bild 18 — Zeitlicher Verlauf der Brandleistung (Wärmefreisetzung) im Brandraum (CFAST 400 m²)

Die Brandleistung (Wärmefreisetzung) des Bemessungsbrandes nach 4.3.1 basiert auf einer quadratischen Brandausbreitung ist als Q_{SOLL} (entspr. Kurve 1 in Bild 18) dargestellt. Die berechnete Brandleistung (Wärmefreisetzung) in der Simulation ist im Brandraum für den untersuchten Fall deutlich geringer (ventilationsgesteuerter Brand) (Kurve 2).

b) Temperatur

Bild 19 zeigt die mittlere Temperatur in der Heißgasschicht in Abhängigkeit von der Branddauer.



Legende

T in °C

t in min

1 Temperaturen im Brandraum unter Bemessungsbrandbeanspruchung ($T_{\text{Bemessungsbrand}}$)

Bild 19 — Zeitlicher Verlauf der Temperatur der Heißgasschicht im Brandraum (CFAST 400 m²)

c) Bauteiltemperatur im Referenzbauteil $d = 200$ /äquivalente Branddauer

Aus der Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion resultiert der nachfolgend gezeigte Temperaturverlauf in einem Referenzbauteil (Betonplatte) in der Heißgasschicht unter der Decke des Brandraumes. Gezeigt ist die in der Simulation berechnete Temperatur in einer Tiefe von 35 mm (von der Belastungsseite gemessen).

Aus dem Abgleich der berechneten Temperaturen mit denen, wie sie sich bei einer Brandbeanspruchung nach der Einheit-Temperaturkurve (ETK) nach DIN 4102-2 einstellen, ergibt sich schließlich die äquivalente Branddauer $t_{\text{äq}}$.

Die sich aus der ermittelten Heißgastemperatur ergebende Bauteiltemperatur im Referenzbauteil, die ETK und die aus der ETK-Belastung resultierende Bauteiltemperatur sind in Bild 20 dargestellt.