

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Allgemeines .....	1
1.2 Brandschutz .....	4
1.2.1 Definitionen.....	4
1.2.2 Technische Brandschutzmaßnahmen .....	4
1.2.3 Organisatorische Brandschutzmaßnahmen.....	5
1.2.4 Ganzheitlicher Brandschutz .....	5
1.3 Ziele des Brandschutzes .....	6
1.4 Berechnungsmodelle und Modellannahmen.....	8
1.4.1 Methoden und Simulationsmodelle.....	8
1.4.2 Modellannahmen.....	11
1.4.3 Geometrie.....	11
1.4.4 Ventilations- und Lüftungsbedingungen .....	12
1.4.5 Brandszenarium.....	12
1.4.6 Empfehlungen für Modellierung .....	13
1.5 Literatur zum Kapitel 1.....	14
<b>2 Grundlagen der rechnerischen Modellierung von Bränden</b> .....	<b>17</b>
2.1 Thermomechanische Berechnungen .....	17
2.1.1 Allgemeines.....	17
2.1.2 Der Verbrennungsvorgang .....	17
2.1.3 Thermochemie und chemische Reaktionen.....	18
2.1.4 Berechnung von Gasgemischen .....	21
2.1.5 Energieerhaltung und Verbrennungswärme .....	22
2.1.6 Berechnung der Bildungsenthalpie brennbarer Stoffe und Anwendungsbeispiele.....	22
2.1.7 Berechnung von Verbrennungsprodukten .....	25
2.2 Wärmeleitung und Konvektion.....	29
2.2.1 Stationäre Wärmeleitung.....	29
2.2.2 Stationäre Wärmeleitung mit Konvektion.....	30
2.2.3 Instationäre Wärmeleitung .....	32
2.2.4 Rechenbeispiele zur instationären Wärmeleitung .....	34
2.3 Grundlagen der Wärmestrahlung.....	37
2.3.1 Einleitung .....	37
2.3.2 Strahlung von festen Oberflächen .....	38
2.3.3 Intensitäts- und Richtungsverteilung der Strahlung .....	40
2.3.4 Berechnung des Wärmeflusses durch Strahlung .....	42
2.3.5 Berechnung der Einstrahlzahlen.....	45
2.3.6 Berechnung des Strahlungsaustausches zwischen Oberflächen eines umschlossenen Raumes.....	52
2.4 Strahlung von Gasgemischen bei Bränden .....	53
2.4.1 Strahlungsintensität von Brandgasen .....	53
2.4.2 Emission von CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O in Brandgasen .....	56
2.4.3 Strahlungsaustausch zwischen Gas und Wand.....	57

2.4.4	Berechnung der Nettostrahlung in einer Rauchgasschicht .....	60
2.5	Berechnung der Wärmestrahlung in einer Halle mit einer Rauchschiht .....	63
2.5.1	Grundgleichungen für die praktische Anwendung .....	63
2.5.2	Beispielrechnung für eine Industriehalle .....	64
2.5.3	Berechnung der Wärmestrahlungsdichte an Empfängern parallel zur Rauchgasschicht in rechteckigen Räumen .....	67
2.6	Grundlagen der Berechnung der Gasströmungen und Temperaturen im Falle eines Vollbrandes .....	70
2.6.1	Historischer Rückblick .....	70
2.6.2	Energiebilanz- und Massenbilanzgleichung .....	71
2.6.3	Konvektionsenergie .....	72
2.6.4	Strahlung durch Öffnungen .....	77
2.6.5	Energieabsorption der Umfassungsbauteile .....	77
2.6.6	Wärmespeicherenergie in den Gasen des Brandraumes .....	81
2.6.7	Sonstige Energien .....	81
2.6.8	Brandleistung .....	81
2.6.9	Flashover .....	83
2.7	Berechnung des Gaswechsels in Räumen mit Dachentlüftung .....	83
2.7.1	Voraussetzungen .....	83
2.7.2	Strömungsgleichungen .....	84
2.7.3	Sonderfälle .....	85
2.8	Berechnungsbeispiele zur Ermittlung von Rauchgasströmungen und Brandleistungen .....	86
2.9	Grundlagen der Modellierung von Bränden mit Mehrraum-Zonenmodellen .....	94
2.9.1	Modellierung des Brandraumes .....	94
2.9.2	Modellierung von Raumsystemen .....	96
2.9.3	Modellierung der Massenbilanz im Brandraum .....	99
2.9.4	Modellierung der Energiebilanz im Brandraum .....	100
2.9.5	Berechnung der Gasströmungen beim Zonenmodell .....	103
2.9.6	Modellierung der Flammen und des Feuerplumes .....	107
2.9.7	Näherungsweise Berechnung der Brandraumtemperaturen .....	109
2.10	Grundlagen der Modellierung von Bränden mit CFD-Modellen .....	112
2.10.1	Allgemeine Einführung .....	112
2.10.2	Spezielle Submodelle in den CFD-Codes FDS, JASMINE und FLUENT .....	113
2.10.2.1	Turbulenzberechnung – Prognosemethoden .....	113
2.10.2.2	Strahlungsmodelle in CFD-Codes .....	115
2.10.2.3	Verbrennungsmodelle .....	115
2.10.2.4	Folgerungen und Hinweise .....	116
2.10.3	Erhaltungsgleichungen .....	116
2.10.4	Turbulenzansätze .....	121
2.10.5	Eddy-Break-Up-Modell der Verbrennung .....	127
2.10.6	Berechnung des Feuerplumes, der Strömungsfelder und Temperaturen in einer Halle .....	129
2.11	Literatur zum Kapitel 2 .....	134
<b>3</b>	<b>Berechnung von Bränden .....</b>	<b>139</b>
3.1	Einführung .....	139

3.2	Brandentstehung .....	140
3.2.1	Bedingungen für die Brandentstehung .....	140
3.2.2	Zündtemperatur und Mindestverbrennungstemperatur .....	141
3.3	Entzündung von Feststoffen .....	143
3.3.1	Trockene Feststoffe .....	143
3.3.2	Besprinkelte Feststoffe unter Sprühwassereinwirkung .....	152
3.4	Berechnung der Wärmestrahlung von Flammen auf brennbare Feststoffe .....	154
3.4.1	Verbrennung und Strahlung .....	154
3.4.2	Theoretische Flammentemperatur .....	155
3.4.3	Berechnung der theoretischen Verbrennungstemperatur .....	156
3.4.4	Strahlung nichtleuchtender Flammen .....	158
3.4.5	Strahlung leuchtender Flammen .....	161
3.4.6	Geometrie der Flammen .....	163
3.4.7	Berechnung der praktisch zu erwartenden Flammentemperaturen .....	165
3.4.8	Wärmestrahlung der Flamme auf Objekte in Flammennähe .....	169
3.4.9	Strahlungsaustausch der Flamme mit einem kleinen Objekt im Raum .....	171
3.5	Entzündung eines brennbaren Feststoffes in einem Brandraum .....	172
3.5.1	Randbedingungen .....	172
3.5.2	Energiebilanz auf der Objektfläche .....	173
3.5.3	Untersuchung thermisch dünner Objekte und Materialien .....	175
3.5.4	Untersuchung thermisch dicker Objekte und Materialien .....	178
3.5.5	Entzündungsparameter .....	180
3.6	Flammenbildung und Feuerplumes .....	183
3.6.1	Flammenbildung .....	183
3.6.2	Turbulente Feuerplumes – Plumetheorie .....	187
3.6.3	Experimentell ermittelte Plumeformeln .....	191
3.6.3.1	McCaffrey-Plume .....	191
3.6.3.2	Zukoski-Plume .....	193
3.6.3.3	Heskestad-Plume .....	194
3.6.3.4	Thomas-Plume .....	195
3.6.3.5	Weitere Plumeformeln .....	197
3.6.4	Flammenausbreitung und Ceiling Jets unter der Decke .....	201
3.7	Literatur zum Kapitel 3 .....	204
<b>4</b>	<b>Verbrennungsabläufe und Stoffdaten .....</b>	<b>207</b>
4.1	Natürlicher Ablauf von Bränden .....	207
4.2	Grundlagen der Berechnung des Ablaufes von realen Bränden .....	212
4.3	Praktische Erfahrungen .....	217
4.4	Grundlagen der Verbrennungsprozesse .....	220
4.5	Flammenausbreitung nach der Entzündung .....	227
4.6	Kalorische Daten brennbarer Stoffe .....	233
4.7	Rauchgaszusammensetzung und optische Rauchdichte .....	237
4.8	Weitere Stoffdaten .....	242
4.9	Brandszenarien – Auswahl und Beispiele .....	254
4.9.1	Definitionen .....	254
4.9.2	Entwicklung und Auswahl von Bemessungsbrandszenarien für die Brandschutzanalyse .....	255

4.9.3	Design Fires .....	256
4.9.3.1	Aufgabe von Design Fires .....	256
4.9.3.2	Systematisierung von Design Fires.....	257
4.9.3.3	Design Fires beruhend auf normativen Temperatur-Zeit-Kurven.....	258
4.9.3.4	Design Fires beruhend auf Brandleistungskurven .....	260
4.9.3.5	Brandleistungskurven aus experimentellen Daten.....	265
4.9.3.6	Parametrische Design Fires .....	268
4.10	Berechnung von Design Fires.....	269
4.10.1	Voraussetzungen .....	269
4.10.2	Grundlagen der Berechnung des Ablaufes von realen Bränden.....	270
4.10.3	Ermittlung eines Design Fires aus einer gegebenen Brandlastaufstellung.....	272
4.11	Praxisbeispiel – Berechnung eines Brandszenariums .....	275
4.11.1	Brandszenarium in einer Industriehalle.....	275
4.11.2	Hinweise und ergänzende Erläuterungen .....	279
4.12	Literatur zum Kapitel 4.....	279
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Rauch- und Wärmeableitung .....</b>	<b>283</b>
5.1	Einleitung .....	283
5.2	Das Verrauchungsproblem .....	283
5.3	Rauchableitung aus eingeschossigen Gebäuden oder einzelnen Geschossebenen.....	288
5.3.1	Der Feuerplume als Grundlage der Rauchbildung .....	288
5.3.2	Rauchableitung durch horizontale Öffnungen.....	290
5.3.3	Bestimmung der Lage der neutralen Ebene.....	297
5.4	Temperatur der Rauchgase .....	299
5.5	Einmischung von Rauchgasen im Überlaufplume (Spillplume).....	303
5.5.1	Vorbemerkungen – Verrauchung von Atrien .....	303
5.5.2	Arten der Plumbildung .....	303
5.6	Neue Untersuchungen über Spillplumes.....	308
5.6.1	Verrauchung von Atrien nach Poreh, Marshall und Harrison .....	308
5.6.2	Verrauchung von Atrien und Einkaufszentren nach Thomas .....	309
5.6.3	Verrauchung von Atrien und Einkaufszentren nach Harrison.....	311
5.7	Vertikale Öffnungen und besondere Maßnahmen für die Entrauchung .....	314
5.7.1	Rauchableitung aus vertikalen Öffnungen .....	314
5.7.2	Besondere Maßnahmen für die Entrauchung von Einkaufsstrassen, Atrien und Gebäuden .....	315
5.8	Praktische Beispiele für die Rauchableitung in Gebäuden .....	316
5.8.1	Berechnung der Entrauchungsöffnung einer Industriehalle .....	316
5.8.2	Berechnung der maschinellen Entrauchung einer Industriehalle .....	318
5.8.3	Berechnung einer Überdruckbelüftung eines Atriums .....	319
5.9	Physikalische Modelle für die experimentelle Untersuchung der Verrauchung in Gebäuden.....	322
5.9.1	Physikalische Skalierung der Entrauchungsmodelle.....	322
5.9.2	Praktische Ausführung eines Modells für Spill-Plume-Untersuchungen .....	324
5.10	Rauchableitung nach DIN 18 232.....	326
5.10.1	Brandszenarien nach DIN 18 232.....	326
5.10.2	Bemessungstabellen nach DIN 18 232.....	329
5.11	Praxisbeispiel – Entrauchung mehrgeschossiger Industriegebäude.....	329

5.11.1	Rauchabzug durch vertikale Öffnungen im Industriebau .....	329
5.11.2	Gebäudebeschreibung .....	330
5.11.3	Ventilationsbedingungen .....	331
5.11.4	Bemessungsbrände .....	332
5.11.5	Lüftungsszenarien .....	334
5.11.6	Gebäudegeometrie .....	335
5.11.7	Rechenergebnisse .....	336
5.11.7.1	Allgemeine Darstellung der Ergebnisse .....	336
5.11.7.2	Vertikale Öffnungsflächen für Geschossbauten mit raucharmen Schichten von mindestens 2,5 m .....	341
5.12	Literatur zum Kapitel 5 .....	344
<b>6</b>	<b>Baurechtliche Grundlagen, Schutzziele und Brandschutzkonzepte.....</b>	<b>347</b>
6.1	Baurecht .....	347
6.1.1	Brandrisiko und Brandsicherheit .....	347
6.1.2	Bauaufsichtliche Akzeptanz ingenieurmäßiger Nachweise .....	353
6.1.3	Brandsicherheitsnachweise .....	357
6.1.3.1	Übersicht .....	357
6.1.3.2	Nachweisberechnungen zur Rauchfreihaltung .....	358
6.1.3.3	Bestimmung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer .....	359
6.1.3.4	Bestimmung der vorhandenen Feuerwiderstandsdauer .....	362
6.1.3.5	Evakuierungsberechnungen .....	363
6.2	Schutzziele .....	363
6.2.1	Einleitung .....	363
6.2.2	Schutzziele im Brandschutzentwurf .....	366
6.2.2.1	Allgemeines Schutzziel im Baurecht .....	366
6.2.2.2	Konkretisierung der Schutzziele .....	367
6.2.3	Schutzzielorientierte Brandschutzbemessung .....	369
6.2.3.1	Vorgehensweise .....	369
6.2.3.2	Realisierung der schutzzielorientierten Brandschutzbemessung .....	371
6.2.4	Sicherheitsaspekte bei der schutzzielorientierten Brandschutzbemessung .....	375
6.3	Brandschutzkonzept .....	376
6.3.1	Stand der Erkenntnisse .....	376
6.3.2	Beispiel für ein zielorientiertes Brandschutzkonzept .....	376
6.3.3	Spezielle Gesichtspunkte für Brandschutzkonzepte .....	380
6.3.3.1	Allgemeines .....	380
6.3.3.2	Berücksichtigung von Panikreaktionen .....	381
6.3.3.3	Technische Dokumentation .....	382
6.3.3.4	Wiederkehrende Prüfungen .....	383
6.3.4	Beurteilung von Brandschutzkonzepten .....	383
6.4	Literatur zum Kapitel 6 .....	385
<b>7</b>	<b>Grundlagen der rechnerischen Nachweisverfahren für Bauteile im Brandfall nach Eurocode.....</b>	<b>389</b>
7.1	Vorbemerkungen .....	389
7.2	Zuverlässigkeitsnachweis gemäß dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept nach EN 1990 .....	391

7.3	Bemessungsgrundlagen nach EN 1991-1-2: Allgemeine Einwirkungen.....	393
7.4	Beispiele für Lastannahmen .....	396
7.4.1	Charakteristische Einwirkungen für ein Bürogebäude .....	396
7.4.2	Träger auf zwei Stützen für ein Einkaufszentrum .....	396
7.4.3	Träger auf zwei Stützen für ein Dachtragwerk.....	396
7.4.4	Näherungslösungen für Lastannahmen .....	397
7.5	Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffkennwerte .....	400
7.6	Thermische Einwirkungen nach EN 1991-1-2 .....	401
7.6.1	Temperatur-Zeit-Beziehungen .....	401
7.6.2	Äquivalente Normbranddauer .....	402
7.6.3	Parametrische Temperatur-Zeitkurven.....	402
7.6.4	Zonenmodelle.....	403
7.6.5	Lokale Temperaturberechnungen.....	405
7.6.6	CFD-Modelle .....	409
7.6.7	Beispiel für ein lokales Brandereignis im Parkhaus .....	409
7.7	Bauteilberechnungen .....	410
7.7.1	Auswahl der Berechnungsmethode .....	410
7.7.1.1	Globale Tragwerksanalyse.....	410
7.7.1.2	Bauteil-Analyse .....	410
7.7.1.3	Analyse eines Teiltragwerkes .....	411
7.7.2	Berechnungsmethoden nach EN 1991-1-2.....	412
7.7.2.1	Tabellarische Daten .....	412
7.7.2.2	Einfache Berechnungsmodelle .....	413
7.7.2.3	Fortgeschrittene Berechnungsmodelle.....	413
7.7.3	Beziehung zwischen dem Berechnungsmodell und dem analysierten Tragwerksteil.....	413
7.7.4	Last-, Zeit- oder Temperatur-Bereiche für nominelle Brände.....	414
7.8	Bemessung von Stahlbauteilen nach Eurocode 3 .....	416
7.8.1	Allgemeine Grundsätze .....	416
7.8.2	Materialmodell für Baustahl nach EN 1993-1-2 .....	417
7.8.3	Temperaturmodell für Stahlbauteile.....	419
7.8.3.1	Unbekleidete Stahlprofile .....	419
7.8.4	Erwärmung von Stahlbauteilen im Brandfall .....	421
7.8.4.1	Wärmestrom und Wärmeübergang.....	421
7.8.4.2	Ummantelte Stahlprofile.....	423
7.8.5	Mechanische Modelle unter Berücksichtigung des Brandangriffes .....	426
7.8.6	Beispiele nach EN 1993-1-2.....	428
7.8.6.1	Aufgabenstellung – Druckbeanspruchte Stahlstütze.....	428
7.8.6.2	Tragfähigkeit einer Stahlstütze mit ungeschütztem Querschnitt nach 30 min Branddauer.....	428
7.8.6.3	Stahlstütze ummantelt mit Brandschutzplatten.....	429
7.9	Literatur zum Kapitel 7.....	430
<b>8</b>	<b>Muster-Industriebaurichtlinie und Baulicher Brandschutz im Industriebau nach DIN 18 230-1 .....</b>	<b>433</b>
8.1	Sicherheitsbetrachtungen, Ziele, Begriffe und Verfahren.....	433
8.1.1	Grundsätzliche Sicherheitsbetrachtungen.....	433

8.1.2	Ziel der Muster-Industriebaurichtlinie .....	434
8.1.3	Begriffe der Muster-Industriebaurichtlinie.....	435
8.1.4	Verfahren der Muster-Industriebaurichtlinie.....	437
8.1.5	Allgemeine Anforderungen.....	438
8.1.6	Anforderungen an Baustoffe und Bauteile sowie an die Größe der Brandabschnitte im Verfahren ohne Brandlastermittlung .....	439
8.1.7	Anforderungen an Baustoffe und Bauteile unter Verwendung des Rechenverfahrens nach DIN 18 230-1 .....	440
8.1.8	Zulässige Flächen von Brandbekämpfungsabschnitten.....	443
8.1.9	Grundsätze für die Aufstellung von Nachweisen mit Methoden des Brandschutzingenieurwesens .....	446
8.2	Nachweis der Brandwirkungen bei realen Bränden nach DIN 18 230 .....	448
8.2.1	Anbindung an die Muster-Industriebaurichtlinie .....	448
8.2.2	Grundlagen der Norm DIN 18 230-1 .....	449
8.2.3	Nachweise nach DIN 18 230-1 .....	453
8.2.4	Gebäudestruktur .....	455
8.2.4.1	Brandbekämpfungsabschnitt und Geschossigkeit.....	455
8.2.4.2	Teilabschnitte nach Anhang A gemäß DIN 18 230-1 .....	455
8.2.4.3	Ebenennachweis nach Anhang B gemäß DIN 18 230-1.....	456
8.3	Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer $t_p$ .....	457
8.4	Rechnerische Brandbelastung $q_R$ .....	458
8.4.1	Bedeutung und Definition der Brandlast.....	458
8.4.2	Methodik der Brandlasterhebung .....	459
8.4.3	Einteilung der Brandlasten .....	459
8.4.4	Rechnerische Brandbelastung $q_R$ .....	460
8.4.5	Abbrandfaktor $m$ .....	460
8.4.6	Erfassung der Brandlasten.....	462
8.5	Umrechnungsfaktor $c$ .....	465
8.6	Wärmeabzugsfaktor $w$ .....	466
8.6.1	Grundlagen für die Ermittlung des $w$ -Faktors .....	466
8.6.2	$w$ -Faktoren für Brandbekämpfungsabschnitte über mehrere Ebenen.....	472
8.6.2.1	Grundsätze des Verfahrens .....	472
8.6.2.2	Mehrgeschossige Brandbekämpfungsabschnitte bei Geschossflächen mit horizontalen Öffnungen von $\leq 2\%$ .....	473
8.6.2.3	Mehrgeschossige Brandbekämpfungsabschnitte bei Geschossflächen mit horizontalen Öffnungen von $> 20\%$ .....	474
8.6.3	Wärmebilanzrechnungen als Ersatz für das Näherungsverfahren .....	475
8.7	Sicherheitsbeiwert $\gamma$ und Beiwert $\delta$ .....	477
8.8	Zusatzbeiwert $\alpha_L$ .....	478
8.9	Literatur zum Kapitel 8.....	479
<b>9</b>	<b>Praxisbeispiel für die Anwendung der M-IndBauRL und DIN 18 230-1 .....</b>	<b>481</b>
9.1	Beschreibung der Aufgabenstellung.....	481
9.2	Brandschutzkonzept.....	481
9.2.1	Erschließung und Gebäudeanordnung.....	481
9.2.2	Nutzung und Brandlasten .....	483
9.2.3	Bauliche Brandschutzeinrichtungen.....	484

9.2.4	Rettungswege .....	485
9.2.5	Brandschutzeinrichtungen .....	487
9.2.6	Sonstige sicherheitstechnische Einrichtungen .....	489
9.2.7	Abwehrender Brandschutz .....	490
9.2.8	Umweltschutz .....	490
9.2.9	Betrieblicher Brandschutz .....	491
9.3	Nachweise nach DIN 18 230-1 und der M-IndBauRL .....	492
9.3.1	Berechnungen für die Brandbekämpfungsabschnitte .....	492
9.3.2	Maximal zulässige Flächen .....	495
9.4	Ebenennachweis – eine neue Möglichkeit für die Brandschutzbemessung im Geschossbau nach DIN 18 230-1 .....	496
9.5	Zusammenfassung .....	497
9.6	Literatur zum Kapitel 9 .....	498