

Leitfaden

Ingenieurmethoden des Brandschutzes

herausgegeben von Jochen Zehfuß

4., überarbeitete und ergänzte Auflage März 2020

Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB)
der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb)
Postfach 4967, 48028 Münster

Technischer Bericht vfdb TB 04-01
4., überarbeitete und ergänzte Auflage März 2020
Vorversion 01 26. März 2020

Hrsg.: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb),
Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 4,
Jochen Zehfuß.

Münster; Braunschweig: vfdb, 2020

494 Seiten, A4

Haftungsausschluss: Dieses Dokument wurde sorgfältig von den Experten der vfdb erarbeitet und vom Präsidium der vfdb verabschiedet. Der Verwender muss die Anwendbarkeit auf seinen Fall und die Aktualität der ihm vorliegenden Fassung in eigener Verantwortung prüfen. Eine Haftung der vfdb und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

Vertragsbedingungen: Die vfdb verweist auf die Notwendigkeit, bei Vertragsabschlüssen unter Bezug auf vfdb-Dokumente die konkreten Leistungen gesondert zu vereinbaren. Die vfdb übernimmt keinerlei Regressansprüche, insbesondere auch nicht aus unklarer Vertragsgestaltung.

© vfdb - Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der vfdb unzulässig. Das gilt insbesondere für die Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Vorbemerkung	11
1 Konzept und Anwendung des Leitfadens	14
1.1 Konzept und Aufbau.....	14
1.2 Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Anwendung	14
1.3 Qualitative Analyse	15
1.4 Quantitative Analyse	16
1.5 Vergleich der Ergebnisse mit den Anforderungen	17
1.6 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	18
2 Erfassung des Gebäudes	19
2.1 Allgemeines.....	19
2.2 Gebäudestruktur	19
2.3 Gebäudeinhalt und Nutzung	20
2.4 Brandschutztechnische Infrastruktur.....	20
2.5 Umgebungseinflüsse.....	21
2.6 Nutzer.....	22
3 Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien	23
3.1 Allgemeines.....	23
3.2 Zusammenhang zwischen Brandrisiken, Brandszenarien und Schutzzielen	24
3.3 Schutzziele	26
3.3.1 Allgemeine Schutzziele	26
3.3.2 Öffentlich-rechtliche Schutzziele und daraus ableitbare funktionale Anforderungen	27
3.4 Weitergehende Schutzziele	32
3.5 Erfüllung funktionaler Anforderungen durch Einhaltung von Leistungskriterien	33
3.5.1 Definition der Schutzziele durch Technische Regeln	33
3.5.2 Konkrete Anforderungen in den Bauvorschriften.....	34
3.5.3 Verknüpfung von Schutzzielen, Nachweisen und Leistungskriterien	34
3.6 Hinweise zum Sicherheitsniveau bei Nachweisen mit Hilfe des Leitfadens	37
3.7 Literatur	39
4 Brandszenarien und Bemessungsbrände	40
4.1 Einleitung	40
4.2 Bemessungsbrandszenarien	41
4.2.1 Allgemeines.....	41
4.2.2 Grundsätze zur Identifizierung der maßgeblichen Bemessungsbrandszenarien	44
4.2.3 Bemessungsbrandszenarien für die Benutzbarkeit der Rettungswege.....	48
4.2.4 Bemessungsbrandszenarien für die Fremdreitung durch die Feuerwehr	48
4.2.5 Bemessungsbrandszenarien für die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr.....	48
4.2.6 Bemessungsbrandszenarien für die Bauteil- bzw. Tragwerksbemessung	49
4.2.7 Brandszenarien zur sachschutztechnischen Risikobewertung.....	51
4.2.8 Sonderfragen	52
4.2.8.1 Lokale Brände (Begrenzung der Brandausbreitung)	52
4.2.8.2 Berücksichtigung von Wind- und Luftströmungen bei Brandsimulationen	52
4.3 Bemessungsbrände	53
4.3.1 Der Brandverlauf und Grundsätze seiner Modellierung.....	53

Inhaltsverzeichnis

4.3.1.1	Allgemeines.....	53
4.3.1.2	Wärmefreisetzungsrates.....	55
4.3.1.3	Bemessungsbrände aufgrund von objektspezifischen Brandversuchen.....	56
4.3.1.4	Bemessungsbrände durch unmittelbare Vorgabe von Brandeinwirkungen.....	56
4.3.1.5	Brände einzelner Gegenstände.....	56
4.3.1.6	Normativ geregelte Zündinitiale.....	57
4.3.2	Ansätze für Bemessungsbrände.....	58
4.3.2.1	t ² -Modell für die Brandentwicklungsphase.....	58
4.3.2.2	Geometrisches Ausbreitungsmodell für die Brandentwicklungsphase.....	61
4.3.2.3	Beschreibung der Vollbrandphase.....	61
4.3.3	Normativ geregelte Bemessungsbrände.....	66
4.3.3.1	Allgemeines.....	66
4.3.3.2	Bemessungsbrände nach der Schwelbrandkurve.....	67
4.3.3.3	Bemessungsbrände für die Vollbrandphase.....	67
4.3.3.4	Vereinfachtes Naturbrandmodell für die Bauteilbemessung.....	68
4.3.4	Flashover.....	70
4.3.5	Objektspezifische Bemessungsbrände für kleine Brandobjekte.....	72
4.3.6	Einfluss von Löschvorgängen auf den Brandverlauf.....	72
4.3.7	Darstellung der Bemessungsbrände in Programmcodes.....	73
4.4	Literatur.....	75
Anhang zu Kapitel 4.....		79
A4.1	Vorbemerkung.....	79
A4.2	Orientierungswerte für die Festlegung von Bemessungsbränden.....	79
5	Modelle für die Brandsimulation.....	92
5.1	Allgemeines.....	92
5.1.1	Überblick.....	92
5.1.2	Zielsetzung der Brandmodellierung.....	92
5.2	Grundlagen der Modellierung von Bränden.....	93
5.2.1	Allgemeines.....	93
5.2.2	Grundlagen des Brandes.....	94
5.2.3	Modellannahmen und -vereinfachungen.....	96
5.2.4	Mathematische Modelle.....	98
5.2.5	Experimentelle Modelle.....	99
5.3	Beschreibung der mathematischen Modelle.....	100
5.3.1	Allgemeines.....	100
5.3.2	Empirische Korrelation.....	100
5.3.3	Vollbrandmodell.....	101
5.3.3.1	Allgemeines.....	101
5.3.3.2	Energiebilanz- und Massenbilanzgleichung.....	103
5.3.4	Zonenmodelle.....	104
5.3.4.1	Mehrraum-Mehrzonenmodelle.....	108
5.3.4.2	Allgemeine Beurteilung von Zonenmodellen.....	108
5.3.5	CFD-Modelle.....	109
5.3.5.1	Räumliche und zeitliche Diskretisierung.....	110
5.3.5.2	Randbedingungen.....	111
5.3.5.3	Turbulenzmodellierung.....	112
5.3.5.4	Verbrennungsmodellierung.....	113
5.3.5.5	Modellierung der Strahlung.....	117

5.4	Validierung und Verifikation mathematischer Modelle	118
5.4.1	Allgemeines.....	118
5.4.2	Bewertung der Prognosefähigkeit.....	121
5.4.2.1	Allgemeines.....	121
5.4.2.2	Charakteristische Unsicherheiten	121
5.4.2.3	Methodik zur Analyse der Zeitreihen aus Versuchen und Simulation	123
5.4.3	Continuous Integration.....	125
5.4.3.1	Allgemeines.....	125
5.4.3.2	Continuous Integration am Beispiel FDS.....	126
5.4.3.3	Verifikationsaufgaben.....	126
5.4.3.4	Validierungsaufgaben	127
5.5	Modellanwendung	130
5.5.1	Allgemeines.....	130
5.5.2	Auswahl der Szenarien	131
5.5.3	Auswahl des Modelltyps.....	132
5.5.4	Interpretation der Ergebnisse.....	135
5.5.5	Anforderungen an die Dokumentation	136
5.5.6	Beispiele zu Anwendungsgrenzen.....	139
5.6	Auswirkungen ausgewählter numerischer und physikalischer Randbedingungen.....	143
5.6.1	Allgemeines.....	143
5.6.2	Wahl der Gitterauflösung	143
5.6.3	Wahl des Zeitschrittes.....	144
5.6.4	Hintergrundströmung	144
5.6.5	Berücksichtigung von Wind.....	145
5.6.6	Sprinkleranlagen	147
5.7	Literatur	148
Anhang zu Kapitel 5		155
A5.1	Empirische Modellierung der Flammen und des Rauchgasplumes	155
A5.1.1	Allgemeines.....	155
A5.1.2	Ceiling Jet	158
A5.1.3	Plume-Temperaturen	160
Beschreibung der Experimentellen Modelle		168
A5.2	Allgemeines.....	168
A5.2.1	Der Begriff der Ähnlichkeit	168
A5.2.2	Eigenschaften des Plumes und die Archimedeszahl	170
A5.2.3	Abbildungsbereich und Abbildungsregeln.....	171
A5.2.4	Hinweise für die Modellierung, Modellmaßstab und Modellgestaltung.....	172
A5.2.5	Besonderheiten bei einzelnen Modelltypen	174
A5.2.6	Der maßstäblich verkleinerte Brand mit identischer Temperaturabbildung.....	174
A5.2.7	Versuche im Maßstab 1:1 (Objektgebundene Versuche).....	174
A5.2.8	Besonderheiten bei Windkanaluntersuchungen	175
A5.2.9	Zusammenfassung.....	176
Beispiele für Berechnungen mit mathematischen Modellen.....		177
A5.3	Vorbemerkungen.....	177
A5.3.1	Plume-Temperatur und Ceiling-Jet.....	177
A5.3.2	Beispiele und Experimente für Vergleichsrechnungen	180
A5.4	Beispiel Validierung PRISME DOOR.....	182
A5.4.1	Durchgeführte Versuche	182

A5.4.2	Durchgeführte Simulationen	184
A5.4.3	Modellaufbau.....	184
A5.4.4	Bewertungsgrundsätze	185
A5.4.5	Ergebnisse der Validierung.....	186
6	Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken	189
6.1	Einleitung	189
6.2	Nachweise nach den Brandschutzteilen der Eurocodes	189
6.2.1	Allgemeines.....	189
6.2.2	Nationale Anhänge (NA)	190
6.2.3	Bauaufsichtliche Einführung	191
6.2.4	Bemessungsverfahren	191
6.3	Einwirkungen im Brandfall.....	192
6.3.1	Vorgehensweise.....	192
6.3.2	Thermische Einwirkungen.....	193
6.3.3	Mechanische Einwirkungen	198
6.4	Materialeigenschaften	201
6.4.1	Thermische Materialeigenschaften	201
6.4.1.1	Allgemeines.....	201
6.4.1.2	Thermische Leitfähigkeit von Beton.....	203
6.4.2	Mechanische Materialeigenschaften.....	204
6.4.2.1	Allgemeines.....	204
6.4.2.2	Spannungs-Dehnungsbeziehungen und thermische Dehnungen	205
6.4.2.3	Versagenskriterien	208
6.5	Bemessungsverfahren	210
6.5.1	Tabellarische Bemessungsverfahren.....	210
6.5.2	Vereinfachte Bemessungsverfahren.....	212
6.5.2.1	Allgemeines.....	212
6.5.2.2	Eurocode 2 Teil 1-2.....	213
6.5.2.3	Eurocode 3 Teil 1-2.....	214
6.5.2.4	Eurocode 4 Teil 1-2.....	216
6.5.2.5	Eurocode 5 Teil 1-2.....	217
6.5.2.6	Zusammenfassung vereinfachte Bemessungsverfahren.....	220
6.5.3	Erweiterte Bemessungsverfahren.....	220
6.5.3.1	Allgemeines.....	220
6.5.3.2	Abnehmende Bauteiltemperaturen	221
6.5.3.3	Thermische Materialeigenschaften von Brandschutzbekleidungen und reaktiven Brandschutzsystemen.....	225
6.5.4	Anwendungshilfen.....	227
6.5.4.1	Allgemeines.....	227
6.5.4.2	Eurocode 2 Teil 1-2.....	227
6.5.4.3	Eurocode 3 Teil 1-2.....	229
6.5.4.4	Eurocode 4 Teil 1-2.....	230
6.5.4.5	Eurocode 5 Teil 1-2.....	231
6.5.5	Beurteilung von Rechenverfahren und Prüfung der Nachweise.....	232
6.5.5.1	Allgemeines.....	232
6.5.5.2	Programmverifikation	233
6.5.5.3	Validierung	233
6.5.5.4	Testen durch Eichbeispiele	233
6.5.5.5	Grenzabweichungen	234

6.5.5.6	Beispielsammlung im Nationalen Anhang	235
6.5.5.7	Ringberechnung.....	236
6.6	Betonabplatzungen	237
6.7	Besondere Bauweisen	238
6.7.1	Hochfester und ultra-hochfester Beton	238
6.7.2	Selbstverdichtender Beton	240
6.7.3	Leichtbeton.....	240
6.7.4	Carbonbeton bzw. textilbeton Carbonbeton	240
6.7.5	Hochfester Bewehrungsstahl	241
6.7.6	Hochfester Baustahl.....	241
6.7.7	Verzinkter Stahl.....	242
6.7.8	Verbundstützen mit Einstellprofilen.....	243
6.7.9	Holz-Beton-Verbunddecken.....	244
6.8	Nachweise nach DIN 4102 Teil 4.....	244
6.9	Industriebau	246
6.10	Zusammenfassung.....	248
6.11	Literatur	249
Anhang zu Kapitel 6		255
A6.1	Ringberechnung.....	255
A6.1.1	Stahlstütze	255
A6.1.2	Stahlbetonstütze	258
7	Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz	261
7.1	Allgemeines.....	261
7.2	Brandmeldeanlagen	263
7.2.1	Allgemeines.....	263
7.2.2	Arten von automatischen Brandmeldeanlagen	264
7.2.3	Wirkung von Brandmeldeanlagen auf das Brandszenario.....	265
7.2.4	Zuverlässigkeit von Brandmeldeanlagen	267
7.2.5	Wirksamkeit von Brandmeldeanlagen	269
7.2.6	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Brandmeldeanlagen.....	272
7.3	Löschanlagen.....	272
7.3.1	Allgemeines.....	272
7.3.2	Arten von Löschanlagen	272
7.3.2.1	Allgemeines.....	272
7.3.2.2	Wasserebellöschanlagen (Einstofftechnologie).....	273
7.3.2.3	Sprinkleranlagen	275
7.3.3	Wirkung von Löschanlagen auf das Brandszenario	276
7.3.4	Zuverlässigkeit von Löschanlagen.....	280
7.3.5	Wirksamkeit von Löschanlagen	282
7.3.6	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Löschanlagen	285
7.4	Rauch- und Wärmeabzugsanlagen	286
7.4.1	Allgemeines.....	286
7.4.2	Arten von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen.....	287
7.4.2.1	Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlage (NRA)	287
7.4.2.2	Maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsanlage (MRA)	287
7.4.2.3	Rauch-Druckdifferenzanlagen (RDA)	288
7.4.2.4	Wärmeabzüge (WA).....	290
7.4.3	Wirkung von Rauch- und Wärmeabzügen.....	290

Inhaltsverzeichnis

7.4.4	Zuverlässigkeit von RWA.....	291
7.4.5	Wirksamkeit von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen.....	293
7.4.6	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch RWA.....	295
7.5	Auslösung von Brandschutzanlagen.....	296
7.5.1	Auslösearten.....	296
7.5.2	Auslösezeitpunkte.....	296
7.5.2.1	Allgemeines.....	296
7.5.2.2	Auslöseelement Glasampulle.....	296
7.5.2.3	Elektronische Auslöseelemente.....	297
7.6	Abwehrender Brandschutz.....	297
7.6.1	Wirkung von Löscharbeiten auf das Brandszenario.....	297
7.6.1.1	Allgemeines.....	297
7.6.1.2	Hilfsfrist.....	299
7.6.1.3	Eingreifzeit.....	300
7.6.1.4	Vereinfachtes Löschmodell.....	301
7.6.2	Zuverlässigkeit von Löschmaßnahmen.....	303
7.6.3	Wirksamkeit von Löscharbeiten.....	305
7.6.4	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch besonders wirksame Löschmaßnahmen.....	307
7.7	Literatur.....	307
8	Personensicherheit in Rettungswegen.....	312
8.1	Nachweiskriterien für die Personensicherheit.....	312
8.2	Lichttrübende Wirkung des Rauches.....	313
8.3	Erkennungsweite von Sicherheitszeichen.....	314
8.4	Die toxische Wirkung von Brandgasen.....	317
8.5	Die thermische Wirkung von Rauchgasen.....	321
8.6	Rauchausbeuten.....	327
8.7	Literatur.....	330
9	Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren.....	333
9.1	Einleitung.....	333
9.2	Berechnung von Räumungszeiten.....	333
9.3	Reaktionszeiten.....	334
9.4	Personenstrommodelle.....	339
9.4.1	Allgemeines.....	339
9.4.2	Abschätzung von Räumungszeiten durch Kapazitätsanalyse.....	340
9.4.3	Makroskopische dynamische Strömungsmodelle.....	342
9.4.4	Individualmodelle.....	345
9.4.5	Modellauswahl und Anwendungsgrundsätze.....	346
9.4.6	Validierung.....	348
9.5	Verhaltensaspekte.....	349
9.5.1	Allgemeines.....	349
9.5.2	Wahl des Fluchtweges.....	349
9.5.3	Verhalten bei unmittelbarer Gefahr.....	350
9.6	Staubildung.....	351
9.6.1	Allgemeines.....	351
9.6.2	Definition von Stau.....	351
9.6.3	Identifizierung von Stau in Personenstrommodellen.....	352
9.6.4	Personendichte.....	352

9.6.5	Beurteilung von Stau.....	353
9.7	Personenzahl	353
9.8	Literatur	355
10	Risikomethoden und Sicherheitskonzept.....	358
10.1	Allgemeines.....	358
10.2	Semi-quantitative Risikomethoden	359
10.3	Quantitative Risikomethoden	361
10.3.1	Einführung.....	361
10.3.2	Ereignisbaumanalyse (ETA)	362
10.3.3	Durchführung einer quantitativen Risikoanalyse	364
10.4	Sicherheitskonzept für den konstruktiven Brandschutz	366
10.4.1	Voraussetzungen und Grundlagen	366
10.4.2	Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers	367
10.4.3	Erforderliche Zuverlässigkeit der Konstruktion im Brandfall	371
10.4.4	Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandschutzbemessung der Konstruktion	372
10.4.5	Berücksichtigung unterschiedlicher Brandszenarien	374
10.5	Sicherheitskonzept für Nachweise der Räumung im Brandfall.....	376
10.5.1	Grundlagen für leistungsorientierte Nachweise	376
10.5.2	Brand- und Räumungssimulation.....	377
10.5.3	Leistungskriterien	378
10.5.4	Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände	379
10.5.5	Probabilistische Quantifizierung des Sicherheitsniveaus	381
10.5.6	Beispiel für probabilistische Nachrechnungen mit einfachen Modellen.....	382
10.5.7	Einfluss von Brandschutzsystemen am Beispiel einer BMA.....	384
10.5.8	Beispiel für probabilistische Nachrechnungen mit komplexen Modellen.....	385
10.5.9	Leistungskriterien und Zuverlässigkeitsanforderungen	387
10.6	Nachweis wirksamer Löscharbeiten	388
10.7	Literatur	391
Anhang 1	Begriffe, Symbole und Einheiten	395
A1.1	Begriffserläuterungen.....	395
A1.2	Symbole und Einheiten	408
Anhang 2	Anwendungsbeispiel	423
A2.1	Einleitung	423
A2.2	Schutzinteressen und Schutzziele	426
A2.3	Brandszenarien und Bemessungsbrände.....	427
A2.3.1	Allgemeines.....	427
A2.3.2	Bemessungsbrandszenario 1 – Beurteilung der Tragkonstruktion	427
A2.3.2.1	Vorgehensweise	427
A2.3.2.2	Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers	428
A2.3.2.3	Erforderliche Zuverlässigkeit für die Brandschutzbemessung der Konstruktion.....	431
A2.3.2.4	Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandschutzbemessung der Konstruktion.....	433
A2.3.2.5	Bemessungsbrand für die Tragwerksbemessung	434
A2.3.3	Bemessungsbrandszenario 2 – Beurteilung der Räumung des Hörsaals	438
A2.3.3.1	Vorgehensweise	438
A2.3.3.2	Erforderliche Zuverlässigkeit für den Nachweis der Räumung im Brandfall	438
A2.3.3.3	Sicherheitsbeiwerte für den Nachweis der Räumung im Brandfall	439
A2.3.3.4	Bemessungsbrand für den Nachweis der Räumung.....	440
A2.4	Ermittlung der Brandwirkungen für die Tragwerksbemessung.....	440

Inhaltsverzeichnis

A2.4.1	Fragestellungen	440
A2.4.2	Auswahl des Modelltyp	441
A2.4.3	Durchgeführte Berechnungen	443
A2.4.4	Ausgewählte Ergebnisse.....	444
A2.4.5	Fazit zur Ermittlung der Brandwirkungen.....	445
A2.5	Brandschutzbemessung der Konstruktion	446
A2.5.1	Tragwerk und Einwirkungen	446
A2.5.2	Materialgesetze.....	451
A2.5.3	Bemessung der Konstruktion mit dem vereinfachten Bemessungsverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2	453
A2.5.3.1	Bemessung auf Temperaturebene	453
A2.5.3.2	Bemessung der stabilitätsgefährdeten Bauteile (hier Stiele)	455
A2.5.4	Bemessung der Konstruktion mit dem allgemeinen Bemessungsverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2	461
A2.5.4.1	Ermittlung der Bauteiltemperaturen.....	461
A2.5.4.2	Tragwerksanalyse.....	463
A2.6	Nachweise der Personensicherheit	469
A2.6.1	Zielsetzung.....	469
A2.6.2	Kriterien zum Nachweis der Schutzzielerfüllung.....	469
A2.6.3	Brandszenarien und Simulation	470
A2.6.3.1	Brand im Hörsaal zum Nachweis der raucharmen Schichthöhe bzw. optischen Dichte („Behinderung der Flucht“)	471
A2.6.3.2	Brand im Hörsaal zum Nachweis der Fractional Effective Dose (FED) („Verhinderung der Flucht“)	472
A2.6.4	Modellierung der Räumung.....	472
A2.6.4.1	Auslegungsgrundlagen.....	472
A2.6.4.2	Vorgehensweise	475
A2.6.4.3	Berechnung der Bewegungszeiten.....	476
A2.6.4.4	Ergebnisvergleich	490
A2.6.5	Schlussbetrachtung.....	491
A2.7	Literatur zu Anhang 2.....	492

VORBEMERKUNG

Das vfdb-Referat 4 „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ hat sich zum Ziel gesetzt, die Entwicklung der Ingenieurmethoden des Brandschutzes zu begleiten, sie entsprechend aufzubereiten und der Praxis in Form eines Leitfadens zur Verfügung zu stellen, der nun in der 4. Auflage vorliegt.

Der Brandschutz ist als Ingenieurdisziplin vergleichsweise jung. Klassische Disziplinen im Bauingenieurwesen wie der Stahlbau oder der Massivbau bauen auf Jahrzehnte bzw. sogar Jahrhunderte alte Erkenntnisse auf. Die Grundlagen sind lange bekannt, die Modelle und Nachweisverfahren oftmals weit entwickelt und langjährig genormt. Die ingenieurtechnischen Verfahren und Modelle des Brandschutzes befinden sich in einem früheren Entwicklungsstand. Die wissenschaftlichen Grundlagen des Brandschutzes wurden weitgehend erst in den 1960er, 1970er und 1980er Jahren gelegt. Die Normung begann im Bereich des konstruktiven Brandschutzes mit der ersten Generation der Eurocodes Anfang des Jahrtausends und setzt bei den ingenieurtechnischen Verfahren für die Brand- und Rauchausbreitung sowie die Personenstromanalyse jetzt erst ein. Der Leitfaden hat von Beginn an einen pränormativen Charakter. Er dient weder als Lehrbuch der Ingenieurmethoden und enthält in weiten Teilen auch keine konkreten Regelungen wie man sie von einer Norm erwarten würde. Der pränormative Charakter äußert sich in einer erläuternden Darstellung von Verfahren und Berechnungsmethoden, Hintergrundinformationen und Anwendungsbeispielen. Die Ausprägung ist dabei in den einzelnen Kapiteln unterschiedlich. In Bereichen, für die bisher keine deutschen oder europäischen Normen vorliegen, wie im Bereich der Personenstromanalyse sind konkrete Regelungen und Nachweisgleichungen vermehrt enthalten, wobei in Bereichen, die bereits normativ geregelt sind, wie z. B. Brandschutznachweise der Eurocodes verstärkt Hintergrundinformationen und Anwendungshilfen gegeben werden. Ein Schwerpunkt der 4. Auflage des Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ liegt daher neben der Beschreibung und Bewertung neu entwickelter Ansätze und Verfahren der Ingenieurmethoden insbesondere auf der Standardisierung und der Verbesserung der Nachweisqualität durch geeignete Validierung und Dokumentationen.

Die erste Auflage des Leitfadens wurde als Technischer Bericht TB 04-01 im Mai 2006 von der vfdb veröffentlicht. Hiermit wurden erstmals für Deutschland die Grundlagen, Randbedingungen und Anwendungshilfen von und für ingenieurtechnische Verfahren im Brandschutz zusammengestellt. Der Leitfaden hat sich in der Folgezeit bei der Erstellung von Brandschutzkonzepten für Sonderbauten unter Verwendung von ingenieurtechnischen Verfahren als sehr hilfreich erwiesen und wurde dem Stand der Wissenschaft entsprechend fortgeschrieben und 2009 in 2. Auflage und 2013 in 3. Auflage herausgegeben. 2015 erfolgte erstmalig auch eine Herausgabe in einer englischsprachigen Fassung.

Das Grundkonzept des Leitfadens besteht seit der 1. Auflage und wird auch in der vorliegenden 4. Auflage praktisch unverändert. Der Grundgedanke ist dabei, dass die Struktur dem realen Ablauf einer Projektbearbeitung bei der Anwendung ingenieurtechnischer Verfahren des Brandschutzes entspricht.

Die 10 Kapitel des Leitfadens wurden im vfdb-Referat 4 von 6 Arbeitsteams (AT) erarbeitet und im ständigen Arbeitskreis (AK) beraten und beschlossen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Aufgaben der Arbeitsteams im Referat 4

AT	Bezeichnung des Arbeitsteams (Federführer)	Kapitel
1	Brandsicherheit in Gebäuden (Dr. Klinzmann)	1 – 3, 10
2	Brandsimulationsmodelle (Dr. Riese)	5
3	Brandszenarien und Bemessungsbrände (Dr. Wiese)	4
4	Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz (Rusch)	7
5	Personensicherheit und Rettungswege (Dr. Schneider)	8 + 9
6	Konstruktiver Brandschutz (Prof. Zehfuß)	6

Eine vollständige Liste der Referatsmitglieder und externen Experten, die in unterschiedlichen Funktionen an der Erarbeitung der einzelnen Kapitel und an der Beratung des Gesamtwerkes mitgewirkt haben, sowie nähere Informationen zur Arbeitsorganisation und den Zuständigkeiten für die einzelnen Themenbereiche finden sich auf der Homepage der vfdb unter:

<http://www.vfdb.de/index.php?content=referat4>

oder auf der Homepage des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig unter

<http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/index.php/322.html>

Die redaktionelle Endbearbeitung des Leitfadens für die 4. Auflage erfolgte nach Vorgaben eines Redaktionsteams aus den Federführenden der Arbeitsteams durch Mitarbeiter des iBMB. Die endgültige Fassung wurde vom Technisch-Wissenschaftlichen Beirat und vom Präsidium der vfdb auf ihren Sitzungen am 12. Februar 2020 zur Veröffentlichung im Internet verabschiedet.

Allen Referatsmitgliedern, vor allem aber den Federführenden der Arbeitsteams, sei an dieser Stelle für ihr großes Engagement gedankt. Mein Dank gilt aber auch den Fachleuten aus der Praxis, die durch Kommentare, Korrekturhinweise und Verbesserungsvorschläge die referats-internen Überlegungen ergänzt haben.

Angesichts der äußerst komplexen Materie und der bei einigen Fragen noch andauernden internationalen Diskussion und Entwicklung wird auch diese 4. Auflage des Leitfadens weiterer Anpassung an neuere Erkenntnisse und Erfahrungen aus der bisherigen Anwendung bedürfen. In der Zwischenzeit sind alle Nutzer des Leitfadens herzlich eingeladen, ihre Kommentare zur Anwendbarkeit bei praktischen Aufgabenstellungen, zu entdeckten Fehlern und offenen Fragen an die unten angegebene Adresse zu richten.

Braunschweig, im März 2020

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß

Vorsitzender des vfdb-Referats 4
und Herausgeber des Leitfadens

Adresse für Kommentare und Anregungen:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß
Vorsitzender des vfdb-Referats 4
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig
Tel. 0531/391-5441 · Fax 0531/391-8201
E-Mail j.zehfuss@tu-braunschweig.de
Internet: <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/>

1 KONZEPT UND ANWENDUNG DES LEITFADENS

1.1 Konzept und Aufbau

Für die Anwendung ingenieurtechnischer Nachweise im Rahmen der Erstellung oder Überprüfung eines Brandschutzkonzeptes werden in diesem Leitfaden Hilfestellungen für die Auswahl geeigneter Methoden und Eingangsdaten zur Verfügung gestellt, mit denen angemessene Brandschutzlösungen entwickelt und nachgewiesen werden können. Der Leitfaden beschreibt in möglichst kompakter Form die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik verfügbaren und ausreichend abgesicherten ingenieurtechnischen Nachweise für die in der Praxis auftretenden Brandschutzprobleme und stellt die benötigten Informationen, Daten und Bewertungskriterien bereit.

Entsprechend den unterschiedlichen Aufgabenstellungen soll der Leitfaden einerseits einen Brandschutzingenieur als Fachplaner in die Lage versetzen, ein Gebäude besonderer Art und Nutzung risikogerecht und wirtschaftlich auszulegen. Der genehmigenden Behörde, dem Prüferingenieur oder der Feuerwehr soll er andererseits helfen, diese Auslegung mit möglichst geringem Aufwand zu überprüfen oder im Fall von Abweichungen von bauordnungsrechtliche Vorschriften Brandschutzanforderungen für die Errichtung und Nutzung des Gebäudes so festzulegen, dass die bauordnungsrechtlichen Schutzziele des Brandschutzes erreicht werden.

Bild 1.1 gibt einen Überblick über den Einsatzbereich von Ingenieurmethoden im Rahmen der brandschutztechnischen Auslegung von Gebäuden (rechter Bildteil) im Vergleich zur klassischen Auslegung durch Einhaltung materieller bauordnungsrechtlicher Vorschriften (linker Bildteil). Für die im rechten Bildteil in chronologischer Reihenfolge aufgeführten Arbeitspunkte enthalten die jeweils genannten Kapitel des Leitfadens die erforderlichen Informationen zu Nachweismethoden und Eingangsdaten.

1.2 Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Anwendung

Der Leitfaden ist insbesondere für die Anwendung auf Gebäude besonderer Art oder Nutzung (Sonderbauten) gedacht, bei denen wegen des Gebäudekonzeptes oder aus betrieblichen Gründen nicht die anerkannten Lösungen verfolgt werden sollen, die aus den bauordnungsrechtlichen Vorschriften hervorgehen, sondern mindestens das gleiche Sicherheitsniveau der anerkannten Lösungen auf andere Weise mit Ingenieurmethoden nachgewiesen werden soll. Die Bearbeitung eines konkreten Projektes erfolgt in mehreren Arbeitsschritten:

- Erstellung einer qualitativen Analyse,
- Erstellung einer quantitativen Analyse,
- Vergleich der Ergebnisse mit den Anforderungen,
- Darstellung und Interpretation der Ergebnisse.

Die mit Ingenieurmethoden ermittelten Ergebnisse dienen entsprechend den gesetzlichen Vorgaben in den Landesbauordnungen bzw. in der Musterbauordnung in erster Linie zur Sicherstellung der Flucht und Rettung von Personen aus einem Gebäude. Sie können im Einzelfall

aber auch wichtige Aussagen zum Umweltschutz und zum Sachschutz bzw. Objektschutz liefern.

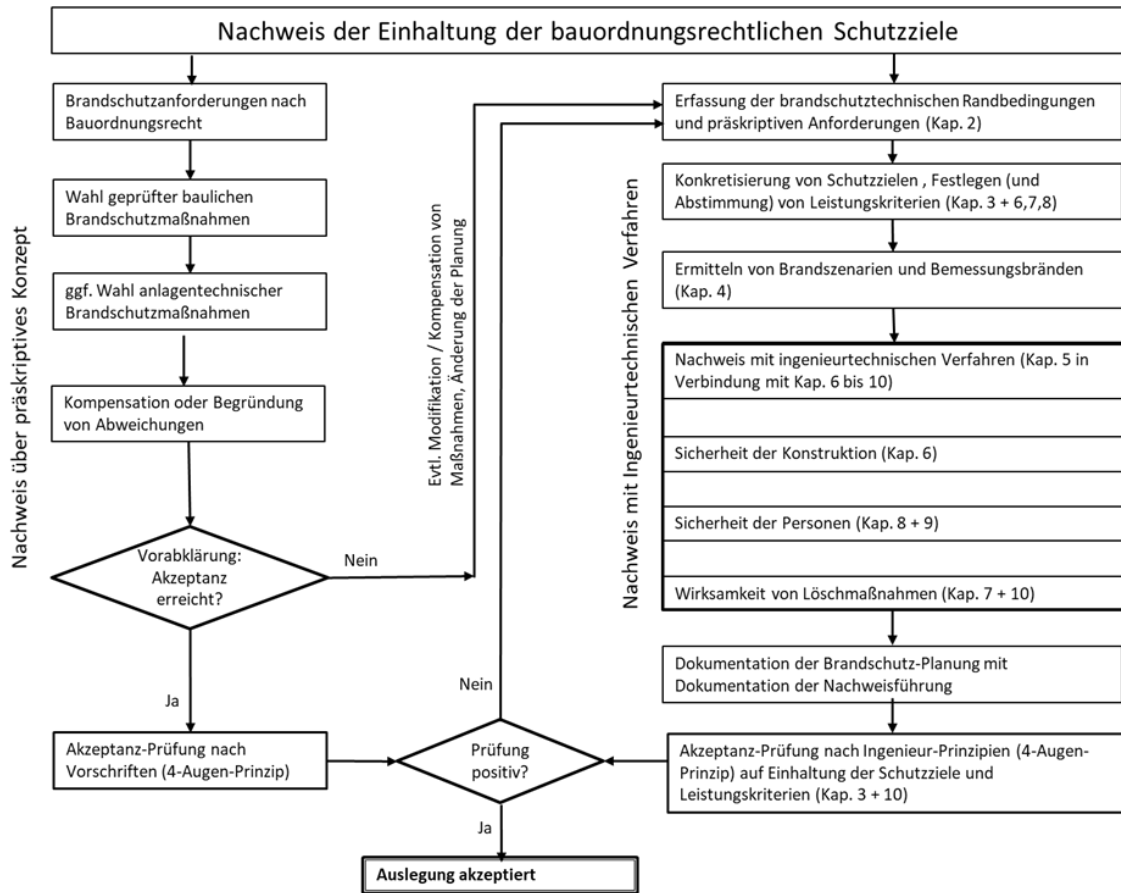


Bild 1.2 Einsatzbereich von Ingenieurmethoden (rechter Bildteil) im Vergleich zu der präskriptiven Vorgehensweise (linker Bildteil) bei der brandschutztechnischen Auslegung

Der Anwender findet im Leitfaden Hinweise und Beispiele für die sachgerechte Auswahl von Nachweisverfahren und Eingangsdaten und die Interpretation der Berechnungsergebnisse. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, dass aufgrund einer entsprechenden Ausbildung Kenntnisse über die Grundlagen des Brandschutzes sowie einschlägige Erfahrungen in der Anwendung von Ingenieurmethoden vorhanden sind.

1.3 Qualitative Analyse

Bei einem Brand in einem Gebäude sind aufgrund der unterschiedlichen Gebäudearten und Nutzungen und des ungewissen Verhaltens von Personen vielfältige Brandszenarien denkbar. Da keine auf alle Gebäude zutreffenden Vorgaben für die erforderlichen Nachweise gemacht werden können, müssen im ersten Arbeitsschritt repräsentative Brandszenarien identifiziert werden. Dies geschieht in einer qualitativen Analyse, bei der sich zweckmäßiger Weise Bauherr, Planer, Brandschutzingenieur, genehmigende Behörde bzw. Prüfsingenieur und Feuerwehr gemeinsam über die allgemeinen und ggf. speziellen Schutzziele (z. B. besondere Anforderungen an die Räumung des Gebäudes) verständigen und grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten skizzieren.

1 Konzept und Anwendung des Leitfadens

In diesem Zusammenhang sind die brandschutztechnischen Randbedingungen des Gebäudes und die Nutzung zu erfassen und als wichtige Eingangsgrößen für die anschließende quantitative Analyse im erforderlichen Detaillierungsgrad zu dokumentieren. Hierzu gehören insbesondere:

- Gebäudekonzept (Gebäudekonstruktion und Baustoffe, Unterteilung in Brandabschnitte, Anordnung und Abtrennung der Rettungswege)
- Nutzungskonzept (Brandlasten, Nutzer, -beabsichtigte Nutzungen und Varianten)
- Infrastruktur (anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen, Vorkehrungen für den abwehrenden Brandschutz)
- Brandszenarien (mögliche Brandorte und Wege der Brandausbreitung, sonstige Randbedingungen des Brandszenarios).

Weiterhin ist zu prüfen, ob bei dem Gebäude ggf. über die bauordnungsrechtlichen Anforderungen hinausgehende Risiken und zugehörige Schutzziele zu berücksichtigen sind. Beispielsweise können Maßnahmen zur Begrenzung einer Betriebsunterbrechung zwischen Bauherr/Betreiber und Versicherer vereinbart werden. Nähere Informationen hierzu finden sich in *Kapitel 3*.

1.4 Quantitative Analyse

Die in der qualitativen Analyse festgelegten Schutzziele und ausgewählten Brandszenarien bilden nun zusammen mit den ermittelten brandschutztechnischen Randbedingungen die Basis für quantitative Untersuchungen verschiedener Teilprobleme mit Hilfe von Ingenieurmethoden. Im Leitfaden werden Grundlagen für folgende, häufig vorkommende Fragestellungen bereitgestellt:

- Brandszenarien und Bemessungsbrände (*Kapitel 4*),
- Modelle für die Brandsimulation (*Kapitel 5*),
- Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken (*Kapitel 6*),
- Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz (*Kapitel 7*),
- Personensicherheit in Rettungswegen (*Kapitel 8*),
- Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren (*Kapitel 9*),
- Risikomethoden und Sicherheitskonzept (*Kapitel 10*).

Die Berechnungsverfahren reichen von einfachen Grund- oder Näherungsgleichungen (z. B. Plume-Formeln für lokal begrenzte Brände oder hydraulische Ansätze zur Ermittlung der erforderlichen Fluchtzeit) bis zu komplexen Simulationsmodellen (z. B. CFD-Modelle zur Berechnung der Rauchausbreitung in Gebäuden oder Individualmodelle zur Räumungssimulation). Die Wahl des angemessenen Verfahrens hängt von den benötigten Aussagen und der geforderten Genauigkeit ab. Zu den einzelnen Fragestellungen werden die nach dem Stand der Technik verfügbaren Berechnungsverfahren erläutert, bevorzugte Anwendungsbereiche aufgezeigt und Hinweise zur Absicherung (Validierung) z. B. durch relevante Brandversuche in

bestimmten Anwendungsgrenzen gegeben. Die für den Anwender wesentlichen Berechnungsergebnisse, ihre Unschärfen und bestehende Interpretationsspielräume werden erörtert.

Im Anhang 2 des Leitfadens wird exemplarisch ein Gebäude Schritt für Schritt nach der empfohlenen Vorgehensweise untersucht. Dabei werden verschiedene Nachweismethoden verglichen und Unterschiede in den Ergebnissen, die auch bei anderen Anwendungen auftreten können, aufgezeigt und interpretiert.

Viele Parameter sind zeitabhängig zu untersuchen, d. h. die Rechenergebnisse für eine Fragestellung dienen als Eingangsgrößen für eine im Brandverlauf (bzw. in der Bearbeitung) später auftretende Fragestellung. Dabei müssen auch gegenseitigen Abhängigkeiten der physikalischen Eingangs- und Ausgangsgrößen beachtet werden, um eine konsistente Gesamtbewertung zu gewährleisten.

Die Verantwortung für die Auswahl eines angemessenen Berechnungsverfahrens und der passenden Eingangsdaten liegt beim Brandschutzingenieur. Wenn für die bestimmte Fragestellung nur unvollständige Eingangsgrößen oder nicht hinreichend abgesicherte Nachweisverfahren vorliegen, muss er entweder auf der sicheren Seite liegende Annahmen treffen oder die bestehenden Unsicherheiten über Parametervariationen berücksichtigen. Im Zweifelsfall kann sogar ein Nachweis durch einen Real- oder Modellversuch notwendig sein.

1.5 Vergleich der Ergebnisse mit den Anforderungen

Die Ergebnisse der quantitativen Analysen (*Kapitel 5 bis 9*) für die relevanten Brandszenarien (*Kapitel 4*) sind mit den für das Objekt wesentlichen Schutzziele und den zugehörigen Leistungskriterien (*Kapitel 3*) zu vergleichen. Für eine risikogerechte brandschutztechnische Auslegung des Gebäudes müssen die definierten Leistungskriterien eingehalten werden. Falls dies in einzelnen Fällen nicht gelingt, können entweder die baulichen oder brandschutztechnischen Randbedingungen geändert oder zusätzliche kompensatorische Maßnahmen vorgesehen werden. Damit sind die davon betroffenen Nachweisschritte zu wiederholen.

Zunächst sind der Brandverlauf und die Brandwirkungen zu untersuchen (*Kapitel 5*). Dabei sind in der Regel zwei Fälle zu betrachten:

- Brandentwicklung und Brandwirkungen im Brandraum selbst als Basis für die thermische Belastung von Bauteilen und die Rauchausbreitung im Raum,
- Brandausbreitung über den Brandraum hinaus als Basis für die thermische Belastung von Bauteilen sowie die Rauchausbreitung und -ableitung in Nachbarbereichen.

Bei der Simulation eines Brandes mit einem Brandmodell spielen folgende Parameter eine Rolle: Wärmefreisetzung, Wärmestrahlung, Wärmetransport (konvektiv und konduktiv), Brandausbreitung, Abbrand, Ventilation, Rauchausbeute, Verbrennungsprodukte (*Kapitel 4*). Die Parameter können durch die anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen (*Kapitel 7*) beeinflusst werden. Unter Einbeziehung dieser physikalischen Größen lassen sich die Grenzzustände, die den einzelnen Schutzziele zugeordnet sind, analysieren. Dazu gehören einerseits Grenzzustände der Tragfähigkeit von Bauteilen und Tragwerken im Brandfall

1 Konzept und Anwendung des Leitfadens

(*Kapitel 6*) und andererseits Grenzzustände der Personensicherheit (*Kapitel 8*) sowie der sicheren Räumung (*Kapitel 9*).

Der Leitfaden wird vor allem bei Gebäuden besonderer Art oder Nutzung Verwendung finden, bei denen die auf „Standardgebäude“ ausgerichteten materiellen Anforderungen des Bauordnungsrechts nicht erfüllt werden können. Mit Hilfe der empfohlenen Nachweise können alternative Brandschutzkonzepte verglichen und Maßnahmen gefunden werden, mit denen nicht direkt erfüllbare materielle Anforderungen wirksam und ohne Einschränkungen im Sicherheitsniveau kompensiert werden können. Das gilt z. B. für die Kompensation von Abweichungen bei

- baulichen Abtrennungen,
- tragenden Bauteilen,
- Rettungsweglängen und –breiten,
- Abstandsanforderungen.

1.6 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse sollte alle Annahmen und verwendeten Randbedingungen aufführen, die zum Verständnis von dritter Seite notwendig sind. In der Darstellung sind vor allem folgende Angaben erforderlich:

- Zielsetzung der Untersuchungen,
- Darstellung des Gebäudes,
- Teilnehmer bei der Erarbeitung der qualitativen Analyse,
- Ergebnisse der qualitativen Analyse mit Angabe der Schutzziele,
- Durchführung der rechnerischen Untersuchungen mit Angabe der verwendeten Annahmen, der verwendeten validierten Modelle bzw. Berechnungsverfahren und der zugehörigen Anwendungsgrenzen,
- Vergleich der rechnerischen Analyse mit den geforderten Schutzzielen,
- Empfehlungen für die baulichen Brandschutzmaßnahmen,
- Empfehlungen für die anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen,
- Empfehlungen für die organisatorischen Brandschutzmaßnahmen beim Betrieb des Gebäudes, z. B. Auflagen, Betriebsanweisungen, Management.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist auch auf deren Unsicherheiten und Bandbreiten einzugehen. Es ist zu erläutern, wie der Einfluss unsicherer Eingangsgrößen und Rechenmodelle und getroffener Annahmen mit Hilfe von Parametervariationen oder auf der sicheren Seite liegenden Annahmen untersucht und berücksichtigt wurde.

2 RFASSUNG DES GEBÄUDES

2.1 Allgemeines

Bevor für ein Gebäude eine brandschutztechnische Beurteilung entsprechend dem vorliegenden Leitfaden vorgenommen werden kann, sind die für die ingenieurtechnischen Nachweise erforderlichen Informationen und Eingangsdaten zusammenzutragen. Sie betreffen vor allem

- die Gebäudestruktur,
- den Gebäudeinhalt und die Nutzung,
- die brandschutztechnische Infrastruktur,
- die Umgebungseinflüsse,
- die Nutzer.

Die Informationen bestehen teilweise aus konkreten Angaben zum Gebäude wie Abmessungen, angrenzende Bebauung und Art der Nutzung oder aus Vorgaben/Vorstellungen der Planer, die im Rahmen der qualitativen Analyse erfasst werden, wie Aufteilung des Gebäudes in Abschnitte, Lüftung, Rauch- und Wärmeableitung oder Art der verwendeten Materialien.

2.2 Gebäudestruktur

Die Gebäudestruktur muss aus den Zeichnungen und weiteren Unterlagen des Planers erkennbar sein. Folgende Angaben sind daraus zu entnehmen bzw. festzulegen:

- Außenmaße des Gebäudes, Höhe und Anzahl der Geschossebenen,
- Lage der tragenden Teile der Konstruktion (Balken, Stützen, Wände) und erforderliche Angaben zum Feuerwiderstand,
- Aufteilung des Gebäudes in Abschnitte mit erforderlichen Angaben zur Qualität der Abtrennungen hinsichtlich des Feuerwiderstands für Wände, Decken, Türen, Dächer sowie Abschlüsse in ihnen,
- Erschließung des Gebäudes von außen und Rettungswege (notwendige Treppenträume und Flure) im Gebäude bis in sichere Bereiche (Rettungsweglängen),
- Anordnung von Treppenträumen, Schleusen (Vorräume) Ausbildung der Konstruktion und Anbindung an die Nutzung in den einzelnen Ebenen des Gebäudes,
- Abtrennung der Flure von den Nutzungen und Treppenträumen, Ausbildung der Konstruktion, Unterteilung der Flure in Abschnitte durch automatisch schließende Rauchschutztüren bzw. -tore (Begrenzung der Rauchausbreitung),
- Anordnung und konstruktive Ausbildung vertikaler und horizontaler Installations- und Lüftungsschächte im Gebäude einschließlich der Absperrvorrichtungen in den Übergängen sowie Angaben über die Installation der Gebäudetechnik und die erforderlichen Abschottungen in Trennwänden und Decken,
- Erfassung von Feuerwehraufzügen, Vorräumen und deren Anbindung,

2 Erfassung des Gebäudes

- Erfassung der baulichen Ausführung von abgehängten Decken und Doppelböden, ihre Abgrenzung zu Nachbarabschnitten sowie ihre Unterteilung,
- Ausbildung der Fassaden und verwendete Materialien sowie Anordnung der Fenster, Türen und Tore,
- Thermische Eigenschaften (Dichte, Wärmeleitung und Wärmekapazität) der verwendeten Baustoffe sowie deren Baustoffklassifizierung.

2.3 Gebäudeinhalt und Nutzung

Die Erfassung des Gebäudeinhaltes und seiner Nutzung ist eine der Grundlagen für die Bewertung eines Gebäudes, da die nutzungsbedingten Brandgefahren und die vorhandene Brandlast sowohl die Dauer als auch die Intensität eines Brandes in einem Abschnitt beeinflusst. Quantitative Angaben zu den brennbaren Stoffen sind notwendig, um die Brandwirkungen im Brandraum und ggf. die Brandausbreitung über den Brandraum hinaus rechnerisch ermitteln zu können. Die Art und Verteilung der Brandlast ist neben den Ventilationsbedingungen bestimmend für die Intensität eines Brandes und die Brandbeanspruchung der Konstruktion sowie für die Menge und Zusammensetzung der entstehenden Rauchgase. Diese können sich im Gebäude ausbreiten und Personen bei der Flucht und Rettung und die Feuerwehr bei den Löscharbeiten beeinträchtigen. Weiterhin können hohe Sachschäden an empfindlichen Geräten durch korrosive Rauchgase entstehen.

Im Rahmen der internationalen Arbeitsgruppe CIB W 14 wurden Erhebungen über die mittleren Brandlastdichten in Gebäuden mit unterschiedlichen Nutzungen durchgeführt (vgl. Anhang zu Kapitel 4, Tabelle A 4.1). Diese Brandlastdichten werden in MJ/m² angegeben. Sie dienen unter anderem als Grundlage für die Festlegung eines Bemessungsbrandes nach Kapitel 4.

Bei Gebäuden mit besonderer Nutzung kann die Brandlastdichte erheblich von den statistisch ermittelten Werten abweichen. In diesen Fällen wird eine individuelle Erhebung notwendig, die bei einem bestehenden Gebäude und entsprechender Nutzung direkt vor Ort durchgeführt wird. Für Neubauten, die sich erst in der Planung befinden, können repräsentative Brandlasten von vergleichbaren Gebäuden und Nutzungen herangezogen werden. Aufgrund der großen Streuungen der Brandlasten sollten dabei mehrere Gebäude in die Untersuchungen einbezogen werden.

2.4 Brandschutztechnische Infrastruktur

Folgende Angaben sind für die Bewertung der brandschutztechnischen Infrastruktur erforderlich:

- Erreichbarkeit des Gebäudes mit Geräten der Feuerwehr,
- Löschwasserversorgung für das Gebäude,
- Brandschutztechnische Unterteilung bzw. Abtrennung des Gebäudes und Gebäudeteilen,
- Anzahl und Lage der Steigleitungen (trocken oder nass) im Gebäude sowie der Hydranten außerhalb des Gebäudes,

- Bereiche mit automatischen Brandmeldern, die auf Rauch, Wärme oder Flammen ansprechen und Alarmsysteme, die akustisch bzw. optisch wirken,
- Bereiche mit selbsttätigen Feuerlöschanlagen (Wasserlöschanlagen, Gaslöschanlagen usw.)
- Bereiche mit automatischen Systemen zur natürlichen Rauchableitung (vertikal bzw. horizontal) bzw. zur maschinellen Rauchableitung,
- Bereiche mit Druckbelüftung wie Treppenräume, Schleusen oder Feuerwehraufzüge.

2.5 Umgebungseinflüsse

Bei der Auslegung und Dimensionierung von natürlich wirkenden Rauchabzügen können Einflüsse aus der Bebauung, aus Windwirkung auf das Gebäude, Temperaturunterschieden zwischen außen und innen, Schneelasten sowie Luftbewegungen im Gebäude von Bedeutung sein.

Wind erzeugt auf der dem Wind zugewandten Seite des Gebäudes einen Überdruck. Der Wind umströmt das Gebäude, sodass an seinen Seiten und auf dem Dach ein negativer Druck bzw. Sog gegenüber der dem Wind zugewandten Seite entsteht. Im Brandfall sollten Rauchabzugsöffnungen nur in Außenwänden freigegeben werden, an denen Windsog (Unterdruck) vorherrscht, und Zuluftöffnungen in Außenwänden mit Winddruck. Das gilt sinngemäß auch bei Ansaugöffnungen für die maschinelle Rauchableitung.

Sofern es für die brandschutztechnische Auslegung von Bedeutung ist, muss das für den Gebäudestandort relevante Temperaturspektrum (Sommer- und Winterfall) berücksichtigt werden. Die Temperaturen im Gebäude können je nach Lage sehr unterschiedlich sein, als Richtwert werden 20 °C verwendet. In hohen Räumen wie Atrien kann es bei Sonneneinstrahlung über der Höhe zu größeren Temperaturunterschieden kommen. Unter der Dachdecke kann sich eine aufgeheizte Luftschicht ausbilden, die im Brandfall nicht von den aufsteigenden und sich mit der Höhe abkühlenden Rauchgasen durchstoßen werden kann (vgl. „Inversionswetterlage“). Dies ist bei der Planung der natürlichen Rauchableitung und der technischen Gebäudeausrüstung zu berücksichtigen.

Schneelasten und Eis können die Funktionsfähigkeit von Rauch- und Wärmeabzügen im Dach behindern bzw. bei automatischer Auslösung zu Zeitverzögerungen führen. Für klassifizierte Geräte ist die Funktionsfähigkeit unter Schneelasten nachgewiesen.

Durch maschinelle Belüftung in Deckennähe können z. B. in großen Ausstellungshallen starke Luftbewegungen erzeugt werden. Dies kann bei einem Brand die aufsteigenden Rauchgase beeinflussen und zu einer unkontrollierten Rauchausbreitung führen. Dabei kann es zu Zeitverzögerungen bei der Auslösung von Rauchmeldern kommen. Unter solchen Bedingungen sind zusätzliche Untersuchungen bei abgeschalteter Lüftungsanlage durchzuführen, um die Auswirkungen auf den Brandverlauf abschätzen zu können.

2.6 Nutzer

Bei den öffentlich-rechtlichen Schutzziele des Brandschutzes steht die Sicherstellung der Flucht und Rettung von Personen im Vordergrund. Hierfür werden Informationen über die zu erwartende Anzahl von Personen im Gebäude und deren wahrscheinliches Verhalten benötigt. Folgende Kriterien sind von Bedeutung:

- **Vertrautheit mit dem Gebäude:** Personen, die sich in dem betroffenen Gebäude täglich aufhalten und die mit den örtlichen Gegebenheiten und mit den Sicherheitsanforderungen vertraut sind, werden im Gefahrenfall den kürzesten Weg in sichere Bereiche wählen. Dagegen werden Personen, die sich im Gebäude nicht auskennen, in der Regel den Weg zur Flucht wählen, über den sie das Gebäude betreten haben.
- **Aufmerksamkeit:** Personen, die ständig in einem Gebäude arbeiten, sowie Personen, die z. B. als Kontaktperson für andere Personen dienen (Information), achten in der Regel stärker auf sich verändernde Situationen.
- **Mobilität:** Wie schnell Personen bei der Flucht durch Türen, Flure und Treppenträume gelangen, kann bei jungen Menschen und Personen in höherem Alter sehr unterschiedlich sein. Für Menschen mit eingeschränkter Mobilität wie Rollstuhlfahrern oder gehbehinderten Personen sind zusätzliche Anforderungen an die Gestaltung der Rettungswege zu stellen.
- **Soziale Zugehörigkeit:** Personen in Gruppen (Familie oder Besuchergruppen) bleiben in der Regel zusammen und bewegen sich als Gruppe ebenso zum Ausgang. In einer Gruppe wird eine Gefahrensituation häufig früher erkannt, allerdings richtet sich die Fluchtgeschwindigkeit meist nach dem Langsamsten der Gruppe.
- **Verantwortlichkeit:** Personen, die in einem Gebäude mit einer gewissen Verantwortung betraut sind, beeinflussen das Verhalten anderer Personen. Durch Hinweise auf Gefahrensituationen werden die Zeiten von der Brandmeldung bis zum Einsetzen der Fluchtbewegung verkürzt.
- **Tätigkeit im Gebäude:** Die Zeit zum Beginn der Fluchtbewegung ist bei Personen in Ruhestellung (Schlafen oder Ruhen) größer als bei Personen die sitzen, stehen oder sich bewegen.
- **Verpflichtung:** Personen, die eine besondere Aufgabe eingegangen sind, wie z. B. Anstehen in einer Warteschlange, gemeinsames Speisen im Restaurant, werden nicht kurzfristig ihren Platz verlassen, wenn die Warnhinweise auf das Feuer nicht eindeutig sind (Alarmanlage oder Ansage zum Räumen des Gebäudes).

In *Kapitel 8* wird das Verhalten der Nutzer genauer erfasst und bewertet. Modelle für die Räumung eines Gebäudes werden in *Kapitel 9* vorgestellt.

3 SCHUTZZIELE, FUNKTIONALE ANFORDERUNGEN UND LEISTUNGSKRITERIEN

3.1 Allgemeines

Die Brandsicherheit in Gebäuden – insbesondere Gebäuden besonderer Art oder Nutzung – ergibt sich aus dem Zusammenspiel von vorbeugenden baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen, organisatorischen Brandschutzmaßnahmen während des Betriebs bzw. der Nutzung sowie abwehrenden Brandschutzmaßnahmen nach Eintritt eines Brandereignisses. Jede Veränderung im Brandrisiko, z. B. durch sehr hohe Brandlasten und / oder Zündgefahren oder übergroße Brandabschnitte, muss durch die erhöhte Gefährdung berücksichtigende Brandschutzmaßnahmen kompensiert werden, um eine angemessene Brandsicherheit auf dem bisher gewohnten Sicherheitsniveau zu erreichen. Veränderungen bezüglich der bisher üblichen Brandschutzmaßnahmen, z. B. Erleichterungen bei den baulichen Brandschutzmaßnahmen oder Einsparungen bei den Einsatzkräften der Feuerwehr, werden zwangsläufig Auswirkungen auf die Brandsicherheit haben – allerdings erst messbar nach statistisch auswertbaren Zeiträumen. Grundlagen und Methoden für eine umfassende Analyse und Bewertung solcher Veränderungen finden sich in [3.9]. Auf dieser Basis wurden vereinfachte Ansätze für eine risikogerechte Vorgabe der Sicherheitsanforderungen für brandschutztechnische Nachweise im abschließenden Kapitel 10 dieses Leitfadens abgeleitet.

Die Schutzziele ergeben sich einerseits aus öffentlich-rechtlichen Vorschriften (wie zum Beispiel Bauordnungsrecht oder dem Arbeitsstättenrecht) und andererseits aus privatrechtlichen Vorschriften und privaten Interessen der Besitzer oder Betreiber eines Gebäudes.

Das Erreichen bauordnungsrechtlicher Schutzziele ist im Rahmen von Brandschutznachweisen bzw. Brandschutzkonzepten nachzuweisen, die in den Bauordnungen der Länder bzw. der Musterbauordnung (MBO) [3.1] gefordert werden. Konkrete Vorgaben für den Inhalt und Gliederung von Brandschutzkonzepten finden sich z. B. in der vfdb-Richtlinie 01/01 [3.2]. Darin werden auch Rechenverfahren des Brandschutzingenieurwesens angesprochen.

Grundsätzlich sollen ingenieurtechnische Brandschutznachweise stets im Zusammenhang mit einem Brandschutzkonzept/ Brandschutznachweis (vgl. vfdb Richtlinie 01/01) erstellt und dokumentiert werden.

Die Leistungsfähigkeit der Brandschutzmaßnahmen muss den Brandgefahren und Brandrisiken der Gebäude einschließlich ihrer Nutzung und den Schutzzielen entsprechen. Dabei ist es aus der Sicht einer Genehmigungsbehörde wichtig, das allgemein erforderliche Sicherheitsniveau des Brandschutzes zu kennen und das im Einzelfall vorhandene und zu genehmigende Sicherheitsniveau zutreffend einschätzen zu können.

Eine schutzzielorientierte Brandschutzbemessung beschränkt sich nicht auf die rechnerische Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer der Bauteile, z. B. in [3.3] für eine Auslegung von Industriebauten z. B. nach [3.4], sondern sie betrifft beispielsweise auch die Auslegung von Rauchabzugsanlagen für die Sicherung der Rettungs- und Angriffswege oder von automatischen oder halbstationären Feuerlöschanlagen zur Ermöglichung wirksamer Löschmaßnahmen in Verbindung mit einer Bewertung der Leistungsfähigkeit des abwehrenden Brandschutzes für das zu beurteilende Gebäude. Dabei kommen verstärkt auch Rechenverfahren des Brandschutzingenieurwesens zur Anwendung, für welche Annahmen über das

Brandgeschehen und Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Brandschutzmaßnahmen benötigt werden. Damit können einzelnen konkreten Brandschutzanforderungen der Bauordnung bzw. Verordnung oder Richtlinie für den Sonderbau abweichende Lösungen begründet oder schutzzielorientierte leistungsorientierte Nachweise geführt werden.

Nachfolgend wird auch der Frage nachgegangen, in wie weit bei der Fortschreibung des technischen Regelwerkes (DIN-, EN-Normen, andere Bemessungsrichtlinien für Brandschutzmaßnahmen) neue Leistungsklassen für Brandschutzmaßnahmen eingeführt werden, die nicht mehr ohne weiteres mit den bauordnungsrechtlichen Schutzziele im Einklang stehen.

Die vielfach zu beobachtende Tendenz, alle risikomindernden Faktoren in den Brandschutzkonzepten explizit zu berücksichtigen, kann dazu führen, dass entsprechende Annahmen und Voraussetzungen, z. B. hinsichtlich der betrieblichen Nutzung, sicherheitsrelevant werden und über Auflagen, z. B. die Anordnung wiederkehrender Prüfungen, sichergestellt werden müssen. Damit wird die Freiheit des Bauherrn eingeschränkt und die organisatorische Verantwortung des Betreibers der baulichen Anlage nimmt zu. Hier sind also einer Anrechnung risikomindernder Faktoren in der Praxis Grenzen gesetzt.

3.2 Zusammenhang zwischen Brandrisiken, Brandszenarien und Schutzziele

Bemessungsbrandszenarien sind unter anderem dadurch charakterisiert, dass sie nicht jedes denkbare oder geschehene Brandereignis auf der sicheren Seite mit abdecken oder einschließen müssen, sondern sie grenzen den abzusichernden Bereich von dem Bereich der akzeptierten Restrisiken ab. Insofern sind Brandszenarien in Verbindung mit Bemessungsbränden ein Bekenntnis zu einem ganz bestimmten Sicherheitsniveau. Jedes Brandszenario beschreibt eine Situation, die mit einem bestimmten Risiko verbunden ist.

Das Risiko kann als Produkt aus der Auftretenswahrscheinlichkeit und der Schadensausmaß definiert werden.

$$\text{Risiko} = \text{Auftretenswahrscheinlichkeit} \cdot \text{Schadensausmaß} \quad (3.1)$$

Demnach lassen sich Risiken beliebig fein differenzierten Risikoklassen zuordnen, wie beispielhaft in Bild 3.1 gezeigt wird. Große und sehr große Risiken können demnach sowohl durch große Auftretenswahrscheinlichkeiten als auch durch ein großes Schadensausmaß begründet sein. Je nach Risikoklasse können die im Einzelfall erforderlichen Brandschutzmaßnahmen bzw. die zugehörigen Leistungsanforderungen abgestuft werden.

3 Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien

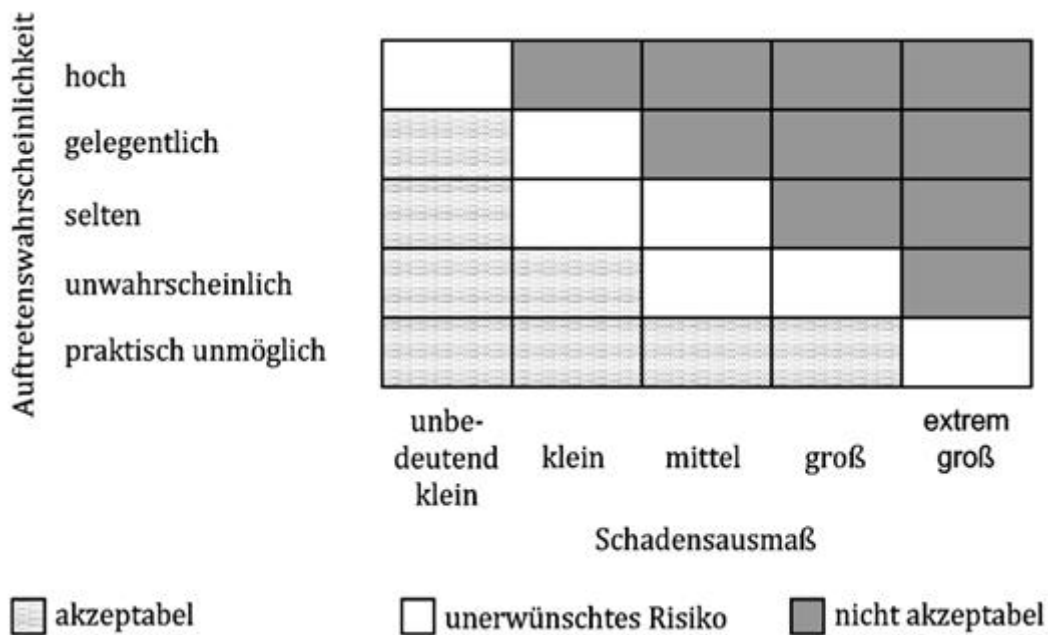


Bild 3.2 Beispiel für die Definition von Risikoklassen (nach DIN EN 18009-1:2016-09)

Die Übertragung der allgemeinen Sicherheitsphilosophie der Landesbauordnungen auf die erforderliche Brandsicherheit bei speziellen Risikoverhältnissen von Sonderbauten ist komplex und vielfach eine Ermessensentscheidung. Grundsätzlich muss nachgewiesen werden, dass die im Einzelfall vorhandenen Brandrisiken mit den speziell gewählten und bemessenen Maßnahmen beherrscht werden, sodass die „allgemeinen Anforderungen“ der LBO in gleicher Weise erfüllt werden. Hierzu heißt es z. B. in § 3 Abs. 1 MBO [3.1]:

„Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden; dabei sind die Grundanforderungen an Bauwerke gemäß Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die Beseitigung von Anlagen und bei der Änderung ihrer Nutzung.“

Ferner wird in §85 a Abs. 1 und 2 MBO [3.1] folgendes festgelegt:

„(1) Die Anforderungen nach § 3 können durch Technische Baubestimmungen konkretisiert werden. Die Technischen Baubestimmungen sind zu beachten. Von den in den Technischen Baubestimmungen enthaltenen Planungs-, Bemessungs- und Ausführungsregelungen kann abgewichen werden, wenn mit einer anderen Lösung in gleichem Maße die Anforderungen erfüllt werden und in der Technischen Baubestimmung eine Abweichung nicht ausgeschlossen ist; §§ 16a Abs. 2, 17 Abs. 1 und 67 Abs. 1 bleiben unberührt.“

„(2) Die Konkretisierungen können durch Bezugnahmen auf technische Regeln und deren Fundstellen oder auf andere Weise erfolgen, insbesondere in Bezug auf:

1. bestimmte bauliche Anlagen oder ihre Teile,
2. die Planung, Bemessung und Ausführung baulicher Anlagen und ihrer Teile,

3. die Leistung von Bauprodukten in bestimmten baulichen Anlagen oder ihren Teilen [...].”

In der Praxis bedeutet dies, dass ein erhöhtes Brandrisiko durch zusätzliche oder leistungsfähigere Brandschutzmaßnahmen kompensiert werden muss. Dagegen kann im Allgemeinen nicht gefordert werden, dass das Brandrisiko durch ein Bündel hochwertiger Schutzmaßnahmen unter das normalerweise akzeptierte Restrisiko gesenkt werden muss.

Grundsätzlich können drei Klassen von Ereignissen unterschieden werden:

- gefährliche Brandereignisse, die von Regelungen zu erfassen sind (zu regelnde, abzusichernde Ereignisse),
- gefährliche Brandereignisse, die von Regelungen nicht unmittelbar zu erfassen sind (Ereignisse des akzeptierten Restrisikos),
- Ereignisse, die als nicht gefährlich eingestuft werden, obgleich sie gewisse Gefährdungspotentiale aufweisen (unkritische, nicht regelungswürdige Ereignisse).

Die Zuordnung von Ereignissen zu einer dieser Klassen ist für den Umfang von Sicherheitsvorkehrungen äußerst wichtig und führt in der Praxis oft zu kontroversen Diskussionen. Betroffen sind insbesondere die Anforderungen an Gebäude hinsichtlich

- Abstände von Nachbargrenzen,
- Anordnung auf dem Grundstück,
- Anordnung und Art von Bauteilen und Baustoffen,
- Brandschutzeinrichtungen und -vorkehrungen,
- Feuerungsanlagen, Heizräume, Aufzüge,
- Rettungswege: Flure, Treppenträume, Gänge,
- zulässige Anzahl von Personen / Nutzern,
- Haustechnische Anlagen: Lüftung, Leitungsanlagen,
- Betriebliche / organisatorische Brandschutzmaßnahmen.

Hinsichtlich der Festlegung der relevanten Brandszenarien wird auf Kapitel 4 und Abschnitt 7 der DIN 18009-1:2016-09 verwiesen.

3.3 Schutzziele

3.3.1 Allgemeine Schutzziele

Brandschutz ist nicht Selbstzweck, sondern dient dem Schutz von Schutzgütern:

- Leben und Gesundheit von Menschen und Tieren,
- Schutz von Sachwerten,
- Schutz der Umwelt
 - Luft (Brandgase)

3 Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien

- Wasser (Löschwasser)
- Erdreich (Löschwasser)
- Fauna und Flora
- Vermeidung von Brandschutt,
- Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehren und Sicherheit der Einsatzkräfte
Dem sicheren Einsatz der Feuerwehren sind personelle und technische Grenzen gesetzt. Diese Grenzen sind zu berücksichtigen. Diesbezügliche Hinweise sind in [7.16] enthalten.
- Risikomanagement
Das bei Einhaltung von bauordnungsrechtlichen Bestimmungen verbleibende Restrisiko wird üblicherweise im Rahmen vom Risikomanagement den Feuerversicherern übertragen. Grundsätzlich ist eine eigene finanzielle Vorsorge möglich.

Der Schutz der oben angeführten Schutzgüter ist im Wesentlichen in öffentlich-rechtlichen und privatrechtlichen Regelwerken formuliert. Zusätzlich kommen für Betreiber baulicher Anlagen noch Schutzinteressen, die in der betriebswirtschaftlichen Sphäre liegen, zum Tragen:

- Schutz von Waren und Produktionsmitteln,
- Begrenzung von Betriebsunterbrechungen (Nutzungsausfall und Lieferverzug bedeutet u. a. Kundenverlust),
- Vermeidung von
 - straf- und zivilrechtlicher Haftung, insbesondere der Führungskräfte
 - Umweltproblemen, die ein negatives Image in der Öffentlichkeit bewirken
 - Probleme beim Wiederaufbau, da in vielen Fällen eine Betriebsanlagenehmigung erwirkt werden muss
 - Optimierung der Kosten für die Versicherungsdeckung durch Präventivmaßnahmen.
- Bewahrung der Kreditwürdigkeit und Versicherbarkeit.

3.3.2 Öffentlich-rechtliche Schutzziele und daraus ableitbare funktionale Anforderungen

Seit ingenieurtechnische Brandsicherheitsnachweise einen festen Platz im Baugenehmigungsverfahren eingenommen haben, kommt der Konkretisierung von Schutzziele in Verbindung mit der Festlegung von Brandszenarien, die der Beurteilung und Genehmigung von Bauvorhaben zu Grunde gelegt werden sollen, eine erhöhte Bedeutung zu.

Dabei sind verschiedene Aspekte wie

- Brandschutzphilosophie und Brandschutzkonzepte,

- Schutzgüter und Schutzziele,
- Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände,
- Bemessung und Auslegung von Brandschutzmaßnahmen und
- Brandsicherheitsniveau

ingenieurgemäß ganzheitlich zu betrachten. Im Detail sind damit eine Vielzahl von Einzelfragen verbunden, z. B. die qualitative und quantitative Beschreibung der Brandszenarien bei Brandverläufen in sprinklergeschützten Räumen. Ansätze für die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Einflussparametern in einem ganzheitlichen Brandschutzkonzept finden sich in Kapitel 7.

Mögliche Schutzziele sind:

- Unversehrtheit von Personen,
- Verhinderung der Brandentstehung,
- Begrenzung der Brand- und Rauchausbreitung.

Sie können durch Erfüllung zugehöriger funktionaler Anforderungen sachbezogen eingehalten werden. Derartige funktionale Anforderungen können sein:

- Schaffung von Voraussetzungen für eine (erfolgreiche) Intervention durch die Feuerwehr, nachweisbar durch personelle und technische Ausstattung zur Sicherstellung einer vereinbarten Hilfsfrist,
- Tragfähigkeit der Baukonstruktion bei bestimmter Brandeinwirkung über eine definierte Zeitdauer,
- Sicherstellung der Mindestdicke einer raucharmen Schicht im Brandfall über einen bestimmten Zeitraum.

Die funktionale Anforderung beschreibt, was (technisch) erreicht werden soll, während das Schutzziel beschreibt, warum etwas erreicht werden soll. In der Regel wird unter Brandschutzgesichtspunkten zwischen Personenschutz, Nachbarschaftsschutz, Umweltschutz und Sachwertschutz unterschieden. In einer ersten Stufe könnte eine Konkretisierung der Schutzziele nach Tabelle 3.1 erfolgen. Grenzkriterien (relative oder absolute) geben an, unter welchen Voraussetzungen die funktionale Anforderung als eingehalten gilt.

Tabelle 3.1 macht deutlich, dass akzeptierte Schadenereignisse vereinbart werden und dass ein Nullrisiko nicht angestrebt werden kann.

3 Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien

Tabelle 3.1 Beispiele für eine Konkretisierung von Schutzzielen [3.8]

Schutz für	Funktionale Anforderung	Leistungskriterium
Personen	Vermeidung von Personenschäden	Art und Anzahl akzeptierter Personenschäden pro Schadensfall
Sachen	Brände auf maximale Flächen begrenzen	< 200 m ²
Umwelt	keine irreversiblen Schäden an Luft, Wasser und Boden sowie Arten (Fauna und Flora) zulassen	Akzeptierte Grenzwerte für zulässige Kontamination von Boden, Luft und Wasser

Eine nächste Stufe der Konkretisierung wird exemplarisch für die bauordnungsrechtlichen Schutzziele in Tabelle 3.2 gezeigt.

Tabelle 3.2 Beispiele für die Konkretisierung bauordnungsrechtlicher Schutzziele des Personen- und Sachschutzes

Funktionale Anforderung	Konkretisierung durch Angabe einzuhaltender Leistungskriterien
Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch	Rauchfreihaltung für die eigenständige Flucht der Personen (objektbezogen zum Beispiel mindestens 10 Minuten bzw. über den nachgewiesenen Zeitraum der Selbstrettung)
Rettung von Menschen	Sicherer Aufenthalt in gesicherten Bereichen bis zur Rettung durch die Feuerwehr (objektbezogen zum Beispiel mindestens 30 Minuten bzw. über den nachgewiesenen Zeitraum der Selbstrettung)
Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten innerhalb eines Gebäudes	Standsicherheit der Konstruktion mehrgeschossiger Bauten (objektbezogen zum Beispiel mindestens 90 Minuten oder über den Brandverlauf eines Naturbrandes), Rauch- und Wärmeabzug über Zeitraum x bei maximaler Rauchsichtdicke y

Für eine wirkungsvolle Risikominderung z. B. durch eine Unterstützung der Selbstrettungsmöglichkeiten oder der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr kommen vor allem Maßnahmen in Betracht, die der Brandentstehung sowie der Entwicklung und Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen. Hierbei handelt es sich um sogenannte Primärmaßnahmen (gegen die Brandentstehung) und um Sekundärmaßnahmen (Begrenzung der Ausbreitung und Entwicklung eines Schadenfeuers). Sie wirken im zeitlichen Vorfeld der baulichen Maßnahmen (Tertiärmaßnahmen), welche vor allem in der Vollbrandphase zur Geltung kommen, wenn die Primär- und Sekundärmaßnahmen versagt haben oder wenn sich das Brandereignis über die Primär- und Sekundärphase hinaus fortentwickelt. Mit den Primär- und Sekundärmaßnahmen wird also im Wesentlichen die Auftretenswahrscheinlichkeit gefährlicher Brandereignisse soweit reduziert, dass die besonderen Risiken der Sonderbauten hinreichend kompensiert (jedoch nicht 100 %-ig ausgeschlossen) werden. Zu den Sekundärmaßnahmen gehören u. a. auch Maßnahmen, die speziell die Rauchausbreitung behindern sollen und die für die Flucht und Rettung sowie für eine wirksame Brandbekämpfung die notwendigen Voraussetzungen den Brandphasen zugeordnet (Tabelle 3.3).

3 Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien

Tabelle 3.3 Zuordnung der Schutzwirkungen von Brandschutzmaßnahmen zu den Brandphasen (vgl. auch Bild 3.3)

Entstehungsbrand	sich entwickelnder Brand	fortentwickelter Brand / Vollbrand	abklingender Brand
Betriebliche Maßnahmen	organisatorische Maßnahmen	Organisation der Feuerwehr	
Brennbarkeit der Baustoffe	Brennbarkeit der Baustoffe; Brennverhalten der Stoffe und Waren	Brandbelastung	Entsorgung
BMA / ELA	BMA / ELA		
Fluchtwege	Flucht- und Rettungswege	Schutzräume	
Feuerlöscher	Hilfsfrist, Feuerlöschanlage, Löschwasserversorgung		
Fenster / Lüftung / maschinelle Entrauchung	Rauchabzugsanlagen (NA / MA)		
Abschottung, Kapselung von Brandlasten	Abschottung, Rauchabschnitte	Abschottung, Brandabschnitte	
	Standstabilität Einzelbauteile	Standstabilität Konstruktion	Standstabilität Gebäudekonstruktion
	Funktionssicherheit technischer Einrichtungen		

3.4 Weitergehende Schutzziele

Treten im Einzelfall zu den öffentlich-rechtlichen Schutzzielen privatrechtliche hinzu, so können weitergehende Anforderungen gestellt werden. Typisch sind die Eigeninteressen eines Anlagenbetreibers, die sich im Prinzip mit Interessen der Sachversicherer decken sollten. Letztere übernehmen ja vertraglich bestimmte, ausgewählte Risiken der Betreiber. Wenn privatrechtliche Schutzinteressen das Maß für die Sicherheitsbeurteilung bestimmen, dann kann die öffentlich-rechtliche Sicherheitsphilosophie, die vornehmlich den Personenschutz und das Gemeinwohl zum Ziele hat, im erweiterten Rahmen angewendet werden und bei größeren Risiken (Produkt aus der Auftretenswahrscheinlichkeit gefährlicher Brände und dem wahrscheinlichen Höchstschaden) zu Brandschutzkonzepten führen, die mit zuverlässigeren oder zusätzlichen Maßnahmen das Brandrisiko noch weiter reduzieren.

Ist die Größe eines zu erwartenden Totalschadens unabhängig von den primären und sekundären Schutzmaßnahmen das Maß für die Sicherheitsbeurteilung, stehen vornehmlich die Maßnahmen der Schadenbegrenzung (brandschutztechnische Abtrennung von Bereichen oder Abstandsregelungen) zur Verfügung. Die entsprechenden Bemessungsbrandszenarien bzw. Bemessungsbrände beziehen sich dann auf den „kontrollierten Abbrand“ eines Bereiches und auf den Schutz der Nachbarschaft und gegebenenfalls der Umwelt. Derartige Szenarien bilden nicht nur eine Grundlage für die Risikoakzeptanz bei versicherungstechnischen Fragestellungen, sondern sie müssen auch unter bauordnungsrechtlichen Belangen bedacht werden, beispielsweise wenn die Brandsicherheit von Gebäuden überwiegend durch anlagentechnische Maßnahmen gewährleistet werden soll. Für den unwahrscheinlichen Fall eines System- und Konzeptversagens (Restrisiko) kann dann in der Regel mit den vorhandenen Maßnahmen des abwehrenden und baulichen Brandschutzes das zu erwartende Brandszenario nicht mehr beherrscht werden.

Anlagentechnische Brandschutzsysteme wie Rauchabzugsanlagen oder Sprinkleranlagen können so konzipiert werden, dass sie sowohl die bauordnungsrechtlichen Schutzziele als auch die Schutzinteressen des Betreibers und / oder Versicherers einer baulichen Anlage abdecken. Insofern wurden technische Regeln entwickelt, die sich auch für ungewöhnliche bzw. seltene Brandszenarien anwenden lassen. Für Brandschutzsysteme, die neben den genehmigungsrelevanten bauordnungsrechtlichen Schutzzielen auch dem Sachschutz genügen sollen, müssen die aus den unterschiedlichen Schutzzielen resultierenden Anforderungen, speziellen Bemessungsbrandszenarien, Leistung- und Akzeptanzkriterien ganzheitlich betrachtet, vereinbart und angewendet werden.

Während im privatrechtlichen Bereich die vielfältigen Schutzinteressen mit verschiedenen Konzepten, die jeweils zwischen dem Versicherer und dem Versicherungsnehmer vereinbart werden und unterschiedliche Gewichtung bei der schutztechnischen und finanziellen Vorsorge aufweisen können, abgedeckt werden können, besteht im öffentlich-rechtlichen Bereich mit den Bauordnungen der Länder eine verbindliche (wenn auch durch die Verwendung unbestimmter juristischer Rechtsbegriffe im Einzelnen nicht immer ganz klare) gesetzliche Vorgabe. Sie wird ergänzt durch die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ (aaRT), die unter Beteiligung aller betroffenen Kreise entwickelt worden sind.

3.5 Erfüllung funktionaler Anforderungen durch Einhaltung von Leistungskriterien

3.5.1 Definition der Schutzziele durch Technische Regeln

Die Legaldefinition der bauordnungsrechtlichen Schutzziele (z. B. in § 14 der *MBO* [3.1]) erfolgt praktisch durch die Einführung bestimmter technischer Regeln als Technische Baubestimmungen zur Erfüllung der allgemeinen Anforderungen, wonach Gebäude so beschaffen sein müssen, dass

- der Entstehung eines Brandes vorgebeugt und die Ausbreitung von Feuer und Rauch begrenzt wird und
- bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren
- sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

In den eingeführten Technischen Baubestimmungen, z. B. in DIN 4102 [3.5] oder DIN EN 13501 [3.7], werden zum Erreichen der genannten Schutzziele Anforderungen gestellt hinsichtlich:

- Brandverhalten der Baustoffe,
- Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile im Hinblick auf Raumabschluss und Tragfähigkeit, ausgedrückt in Feuerwiderstandsklassen,
- Dichtheit der Verschlüsse von Öffnungen und
- Anordnung von Rettungswegen.

Mit der DIN 4102, DIN EN 1363 und der MVV TB [3.10] nach § 85a MBO werden die öffentlich-rechtlichen Erwartungen an die Brandsicherheit auch insofern definiert, als dort durch die Prüfanforderungen und Prüfbrände die Einwirkungen und die Versagenskriterien eindeutig genannt sind. Ferner ist mit der Zertifizierung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten auch die Einhaltung des zu Grunde liegenden Sicherheitskonzeptes gewährleistet. Weiterhin müssen die zur Einhaltung der Schutzziele erforderlichen anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen die Anforderungen der jeweils maßgeblichen Regeln der Technik erfüllen.

Damit die Technischen Regeln als Bestandteile einer Legaldefinition bauordnungsrechtlicher Schutzziele der Brandsicherheit dienen können, müssen sie folgende Elemente beinhalten:

- definierte Einwirkungen (definierte Brandszenarien und Bemessungsbrände: z. B. das Brandmodell eines Vollbrandes mit einer Entwicklung der Raumtemperatur nach der Einheitstemperaturzeitkurve der DIN 4102)
- definierte Versagenskriterien (Versagensmodell: z. B. maximale Oberflächentemperatur oder Durchbiegungsgeschwindigkeit von Bauteilen)
- definiertes Sicherheitskonzept (z. B. definierte Ausnutzungsreserven für die „kalte“ Tragfähigkeit in Form von zulässigen Spannungen) und
- definierte Anwendungsregeln.

3.5.2 Konkrete Anforderungen in den Bauvorschriften

Oft beinhalten die Bauvorschriften keine Schutzzieldefinitionen in Form einer Beschreibung von Brandmodell (Bemessungsbrandszenarium und Bemessungsbrand), Versagensmodell konkretisiertes Schutzziel / Leistungsanforderung) und Sicherheitskonzept (Sicherheitsbeiwerte / Sicherheitsabstand), sondern lediglich materielle Anforderungen an bestimmte Schutzmaßnahmen. Welche Schutzziele hinter diesen materiellen Anforderungen im Einzelnen zu sehen sind bleibt dem Anwender der Bauordnungen und der Sonderbauvorschriften oft verborgen. Jedenfalls gibt es auf der Suche nach alternativen Lösungen durch andere Maßnahmen bei der Interpretation dieser Vorschriften einen großen Ermessensspielraum.

Mit den Zeitangaben in Bild 3.4 wird der Versuch unternommen, dem zeitlichen Verlauf des Brandes typische Schutzziele zuzuordnen. Folgendes Gedankenmodell liegt dem zu Grunde: Bei einem ungeschützten Aufenthalt in einer „Brandrauch-Atmosphäre“ jenseits der Erträglichkeitsgrenzen über die Zeitdauer der Reanimationsgrenze hinaus, sinkt die statistische Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Fremdrettung unter 50 %. Die Zeitangaben können lediglich grobe Orientierungswerte sein. Objektabhängig könnten deutlich andere Werte maßgebend werden. Beurteilungswerte für die Erträglichkeitsgrenzen unter verschiedenen Aspekten werden in Kapitel 8 angegeben. Sie dienen bei Nachweisen mit Brandsimulationsmodellen in der Regel als Beurteilungsgrundlage für die Personensicherheit.

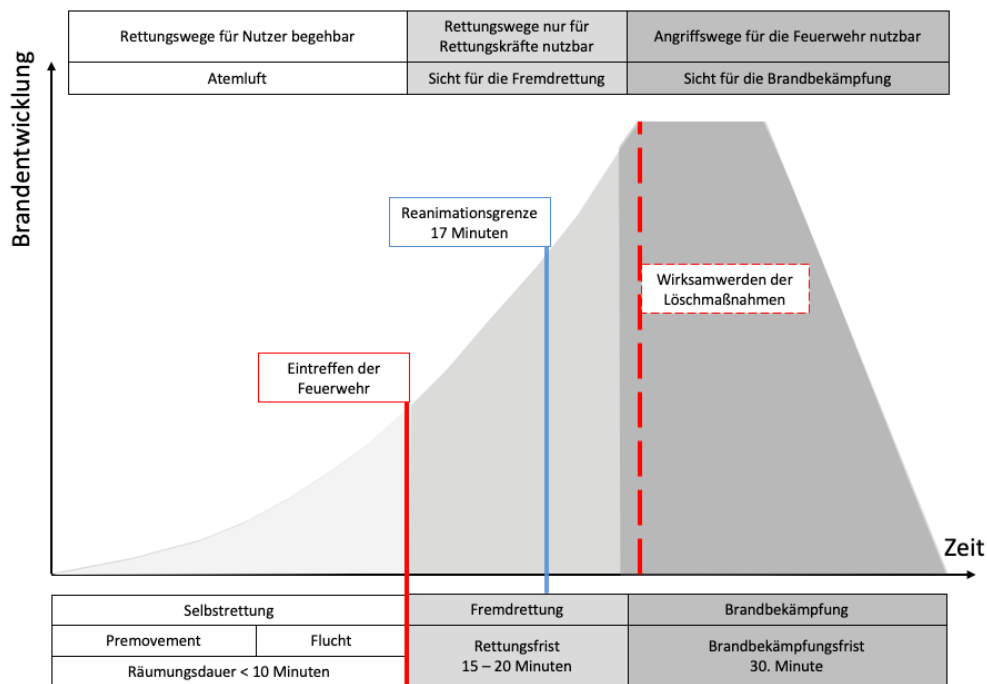


Bild 3.4 Brandphasen mit zugeordneten Hauptnutzungen der Rettungswege und Bedingungen für die Nutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall

3.5.3 Verknüpfung von Schutzzielen, Nachweisen und Leistungskriterien

Dieser Leitfaden soll dem Anwender Hilfestellung bei der Erstellung oder Prüfung eines schutzziel- und leistungsorientierten Brandschutzkonzeptes und bei der Auswahl der entsprechenden ingenieurmäßigen Nachweise und Kriterien bieten. Da die einzelnen Schutzziele

3 Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien

nicht voneinander unabhängig sind und die Brandschutzmaßnahmen sich zum Teil auf mehrere Schutzziele auswirken, ist es für den Anwender nicht einfach, die relevanten Nachweise und Leistungskriterien zu erkennen.

Am Beispiel der öffentlich-rechtlichen Schutzziele wird daher in Tabelle 3.4 versucht, die hierfür in Frage kommenden Nachweise und die in den Nachweisen einzuhaltenden Leistungskriterien möglichst übersichtlich in Tabellenform zusammenzustellen. Diese Übersicht soll helfen, die entsprechenden Nachweise und Leistungskriterien in den nachfolgenden Kapiteln des Leitfadens einfacher zu finden.

Tabelle 3.4 Zusammenhang zwischen Schutzzielen, funktionalen Anforderungen, qualitativen Nachweisen und Leistungskriterien für quantitative Nachweise

Schutzziel	Funktionale Anforderung und qualitativer Nachweis	Leistungskriterien für einen quantitativen Nachweis
Öffentliche Sicherheit und Ordnung - Schutz von Leben und Gesundheit - Rettung von Menschen und Tieren ermöglichen	Sichere Benutzbarkeit der Rettungswege für eine definierte Zeitdauer durch: - Erfüllung materieller Anforderungen an die Rettungswege und / oder - Nachweis der Räumung des Gebäudes vor Eintreten kritischer Zustände $t_{\text{Räumung}} < t_{\text{verfügbar}}$ ⇒ siehe Kapitel 9	- Zwei unabhängige Rettungswege - Maximal zulässige Rettungsweglänge - Umfassungsbauteile mit Feuerwiderstand - Mindestbreiten von Rettungswegen und Ausgängen - Mindestanforderungen an Baustoffe - $t_{\text{Räumung}}$ gemäß Handrechnung oder Räumungssimulation - $t_{\text{verfügbar}}$ als Vorgabe oder nach Brandsimulation ⇒ siehe Kapitel 5
	Sicherheit der Personen bei Einwirkung von - Rauch - (Atem-)Gifte - hohen Temperaturen Nachweis mittels - analytischer Gleichungen - Zonenmodell (Rauch, Temperatur) - Feldmodell (alle) ⇒ siehe Kapitel 5	- Raucharme Schichthöhe oder optische Rauchdichte oder Sichtweite - maximaler FED-Wert, - maximale Gastemperatur oder maximale Wärmestrahlung ⇒ Beurteilungswerte siehe Kapitel 8
	Standsicherheit der Konstruktion und Raumabschluss der Rettungswegumschließung für die Dauer der Selbst- und Fremdreterung. Nachweis durch: - Erfüllung materieller Anforderungen an Bauteile - Nachweis mittels vereinfachter oder allgemeiner Bemessungsverfahren ⇒ siehe Kapitel 6	- tabellarische Daten (Technische Regeln z.B. DIN 4102-4, Eurocodes oder Verwendbarkeitsnachweise wie abZ, abP, ETA, hEN) - z. B. kritische Stahltemperatur - z. B. Tragfähigkeit bei Brandeinwirkung.

Tabelle 3.4 Fortsetzung

Schutzziel	Funktionale Anforderung und qualitativer Nachweis	Leistungskriterien für einen quantitativen Nachweis
Der Brandentstehung vorbeugen	Beschränkung brennbarer Baustoffe. Nachweis durch: - Verwendbarkeitsnachweis wie (abZ, abP) - Versuch	- Normvorgaben - Prüf- und Zulassungskriterien - z. B. Brandschacht, SBI
Der Ausbreitung von Feuer und Rauch begrenzen	Begrenzung der Brandwirkungen auf eine Nutzung - Erfüllung materieller Anforderungen an abtrennende Bauteile - Nachweis der Brandwirkungen ⇒ <i>siehe Kapitel 5</i>	- Prüfkriterien zu Raumabschluss bzw. Rauchdichtheit - Mindestabstand zu Nachbargebäude oder - Normanforderungen an Gebäudeabschlusswand oder Brandwand - z. B. maximale Temperatur oder Wärmestrahlung
Wirksame Löscharbeiten ermöglichen	Standicherheit der Konstruktion und Raumabschluss der Angriffswege für die Dauer der Löscharbeiten durch: - Erfüllung materieller Anforderungen an Bauteile - vereinfachte Bemessungsverf. - allgemeine Bemessungsverf. ⇒ <i>siehe Kapitel 6</i> Bereitstellung von Flächen für die Feuerwehr, Nachweis der ausreichenden Löschwassermenge, Bereitstellung von Brandbekämpfungseinrichtungen - Selbsthilfeanlagen - Steigleitungen - Löschhilfeanlagen Frühe Branderkennung und -meldung Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse durch Rauchableitung ⇒ <i>siehe Kapitel 5 + 10</i>	- tabellarische Daten (Technische Regeln z.B. DIN 4102-4, Eurocodes oder Verwendbarkeitsnachweise wie abZ, abP, ETA, hEN) - z. B. kritische Stahltemperatur - z. B. Tragfähigkeit bei Brandeinwirkung - Normanforderungen - Löschwasserbedarf nach DVGW W405 - z. B. Feuerlöscher nach ASR 2.2 - modifizierte Anforderungen ⇒ <i>siehe Kapitel 7 und 10</i> - z. B. Mindestrauchabzugsflächen - Grenzwerte für optische Dichte bzw. Sichtweite ⇒ <i>Beurteilungswerte siehe Kapitel 8</i>
Öffentliche Sicherheit und Ordnung, Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen	Verhinderung der Kontamination der Umwelt (Luft, Boden, Gewässer) durch - Erfüllung materieller Anforderungen (z.B. Löschwasserrückhaltung) - Nachweis der Schadstoffentstehung/-ausbreitung (Störfallanalyse)	- Feuerwiderstandsklasse der Bauteile - maximale Lagermengen - zulässige Schadstoffkonzentration ⇒ <i>Beurteilungswerte siehe Kapitel 8</i>

Grundsätzlich können anstelle eines individuellen Nachweises Standardanforderungen an eine bestimmte Brandschutzmaßnahme gemäß Landesbauordnung oder Sonderbauvorschrift erfüllt werden. Diese Möglichkeit wird in der mittleren Spalte der Tabelle 3.4 jeweils als erste aufgeführt. Danach folgen – soweit verfügbar - vereinfachte und allgemeine Nachweise. In der rechten Spalte finden sich die in den Nachweisen zu ermittelnden Leistungskriterien, die mit entsprechenden oberen oder unteren Grenzwerten nach bauordnungsrechtlicher Festlegung oder anerkannten Berechnungsansätzen zu vergleichen sind.

3.6 Hinweise zum Sicherheitsniveau bei Nachweisen mit Hilfe des Leitfadens

Der Brandfall ist eine außergewöhnliche Bemessungssituation, die mit einer vergleichsweise geringen Wahrscheinlichkeit innerhalb der Nutzungsdauer eines Gebäudes auftritt. Für eine außergewöhnliche Bemessungssituation werden üblicherweise im Vergleich zu Situationen des normalen Betriebs geringere Sicherheitsanforderungen an die Auslegung von Maßnahmen gestellt. Beispielsweise werden in semi-probabilistischen Sicherheitskonzepten für die Bemessung von Tragwerken (vgl. [3.10]) die für die Gebrauchslastfälle geltenden Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Bauwerkswiderstände in der Regel auf 1,0 reduziert, so dass die betreffenden Einflussgrößen grundsätzlich mit ihren charakteristischen Werten, d. h. den Nennwerten gemäß den jeweiligen Last- oder Baustoffnormen, eingehen. Darüber hinaus werden bei der Kombination von Einwirkungen weitere Reduktionen mit Kombinationsbeiwerten vorgenommen, weil das gleichzeitige Auftreten mehrerer, voneinander unabhängiger außergewöhnlicher Einwirkungen zusätzlich zum Brandfall höchst unwahrscheinlich ist. Als charakteristische Werte werden in der Regel nicht die Erwartungswerte verwendet, sondern zur sicheren Seite hin erhöhte bzw. abgeminderte Fraktile.

Entsprechend dieser heute für alle Auslegungen im Bauwesen gültigen Sicherheitsphilosophie wird im Rahmen dieses Leitfadens folgendes Konzept verfolgt:

- Die in Kapitel 4 vorzugebenden Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände müssen gegenüber den Erwartungswerten auf der sicheren Seite liegen und zufällige Streuungen und Ungewissheiten angemessen berücksichtigen.
- In der Regel sind dazu die Brandbelastung und die Wärmefreisetzungsrate unter Berücksichtigung ihrer Streuungen als obere Fraktile vorzugeben. In Anlehnung an DIN EN 1991-1-2/NA [3.5] wird in diesem Leitfaden von 90 %-Fraktilen ausgegangen (in der internationalen Literatur werden 80 %- bis 95 %-Fraktile angegeben). Unsicherheiten hinsichtlich des Abbrandverhaltens unter den vorliegenden Randbedingungen (z. B. Brandlastanordnung, Ventilationsverhältnisse) sollen darüber hinaus durch Parametervariationen berücksichtigt werden.
- Bei der Ermittlung der Brandwirkungen nach Kapitel 5 wird unterstellt, dass die dort beschriebenen Brandmodelle innerhalb ihrer Anwendungsgrenzen die physikalischen und thermodynamischen Verhältnisse im Mittel zutreffend wiedergeben, sie müssen für den Anwendungsfall validiert sein.
- Als Vergleichsmaßstab für die anzustrebende Konservativität der rechnerisch zu ermittelnden Brandeinwirkung kann die Einheits-Temperaturzeitkurve in Verbindung mit der bauordnungsrechtlich geforderten Feuerwiderstandsdauer als nominelle

Brandbeanspruchung für Nachweise des Brandverhaltens von Bauteilen dienen. Sie deckt die Wirkungen unterschiedlicher natürlicher Brandverläufe bei Gebäuden normaler Art oder Nutzung überwiegend auf der sicheren Seite liegend ab.

- Bei den Nachweisen der Bauteile und Tragwerke entsprechend Kapitel 6 ist grundsätzlich das an der o. g. Sicherheitsphilosophie orientierte Sicherheitskonzept gemäß den Brandschutzteilen der Eurocodes und den zugehörigen Nationalen Anhängen zu Grunde zu legen.
- Für Nachweise der Personensicherheit nach Kapitel 8 und für Personenstromanalysen nach Kapitel 9 wird wie bei Kapitel 5 unterstellt, dass die verwendeten Modelle die Realität im Mittel zutreffend wiedergeben und dass die verwendeten Beurteilungswerte für die zugehörigen Leistungskriterien (vgl. Tabelle 3.5 und Tabelle 3.6) ausreichende Konservativitäten enthalten.
- Differenzierte Sicherheitsanforderungen für besondere Brandrisiken lassen sich im Einzelfall mit Hilfe der Angaben und Methoden in Kapitel 10 begründen. Bei Bedarf kann mit Kapitel 10 auch das erreichte Sicherheitsniveau für eine vorhandene, ggf. nicht den Vorgaben entsprechende Brandschutzauslegung quantitativ nachgewiesen und ggf. durch optimierte Maßnahmen korrigiert werden.

3.7 Literatur

- [3.1] Musterbauordnung – MBO – Fassung November 2002 zuletzt geändert am 22.02.2019.
- [3.2] vfdb-Richtlinie 01-01 „Brandschutzkonzept“
- [3.3] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Ausgabe September 2010.
- [3.4] Muster-Industriebaurichtlinie – M IndBauRL, Mai 2019.
- [3.5] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09 – Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [3.6] DIN 4102. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.
- [3.7] DIN EN 13501. Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten.
- [3.8] ISO 16733-1:2015: Fire Safety Engineering: Design Fire Scenarios and Design Fires, September 2015.
- [3.9] DEHNE, M.: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig, Heft 169 (2003).
- [3.10] DIN EN 1991-1-2:2010-12 – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerk.
- [3.11] MVV TB: Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen. Ausgabe August 2017.
- [3.12] ISO/WD TS 16733- Fire safety engineering- Selection of design fires- Part 2: Design fires, 2019

4 BRANDSZENARIEN UND BEMESSUNGSBRÄNDE

4.1 Einleitung

In einer baulichen Anlage ist in Abhängigkeit der örtlichen und zeitlichen Verhältnisse eine Fülle theoretisch denkbarer Brandverläufe möglich. Für jeden Raum, jede Nutzungseinheit und jeden Brandabschnitt sind viele Brandszenarien denkbar, die sich aus einer Reihe von Einflussgrößen wie z. B. Brandursache, Ort der Brandentstehung, besondere Brandgefahren und weiteren möglichen brandbeeinflussenden Faktoren ergeben. Für die brandschutztechnische Bemessung einer baulichen Anlage müssen daher so genannte Bemessungsbrandszenarien definiert werden. Gemäß DIN 18009-1 [4.1] beschreiben Bemessungsbrandszenarien alle wesentlichen Parameter, die auf den Verlauf des Brandes und die sicherheitsrelevanten Ereignisse Einfluss nehmen können. Dazu gehören insbesondere auch modellhaft das Zusammenwirken von Brandschutzmaßnahmen, die Einflussnahme von Personen (z. B. betriebliche Maßnahmen, Brandlöschung durch Mitarbeiter) und die Wirkung haustechnischer Einrichtungen. Aspekte der Nutzungsart und ggf. von äußeren klimatischen Bedingungen werden ebenfalls berücksichtigt [4.2].

Um einen belastbaren Nachweis zu führen, ist der Brandverlauf für die Bemessung anhand maßgeblicher Bemessungs-Brandszenarien qualitativ zu beschreiben und mit Hilfe von Bemessungsbränden zu quantifizieren. Ziel der Szenarienfestlegung und -konkretisierung ist es, den „Lastfall Brand“ für den betreffenden Einzelfall durch Bemessungsbrandszenarien so zu definieren, dass die sich daraus ergebenden Brandverläufe, die als Bemessungsbrände definiert werden, in einem tatsächlichen Brandfall nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit übertroffen werden.

Bei der Beurteilung der Brandwirkungen von Bemessungsbrandszenarien und bei der Anwendung von Brandsimulationen wird in der Regel nicht die Verbrennung berechnet, sondern die Wirkungen eines vorab als Quellterm spezifizierten Brandes. Im Vorfeld der Brandsimulationen sind hierbei die zu untersuchenden Brandszenarien hinsichtlich Wärme- und Rauchfreisetzung als Bemessungsbrand zu quantifizieren. Der so hergeleitete Bemessungsbrand dient dann als notwendige Eingabe für Brandsimulationen. Dieses Kapitel befasst sich mit Methoden zur theoretischen Herleitung von Bemessungsbränden, welche insbesondere zur Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Wärmefreisetzungsrates (Brandverlaufskurve) dienen. Angaben zur Freisetzung von Brandprodukten, beispielsweise zu den Rauchausbeuten, sind im Kap. 8 dieses Leitfadens enthalten.

Mit den Festlegungen in diesem Kapitel soll erreicht werden, dass die maßgeblichen Rechenannahmen bezüglich des Brandgeschehens nach einheitlichen Kriterien bestimmt werden und damit einer kleineren Streubreite unterliegen.

Ziel der Festlegung von Bemessungs-Brandszenarien und Bemessungsbränden ist die Ermöglichung auf der sicheren Seite liegender Berechnungen. Mit den Rechenannahmen müssen alle wahrscheinlichen Brände abgedeckt werden. Der „Abdeckungsgrad“ aller möglichen Brandereignisse hängt insbesondere von der Vorgabe der Schutzziele ab. Sogenannte „worst case“ Fälle, deren Randbedingungen extrem unwahrscheinlich sind, müssen hingegen in der Regel (s. Kapitel 3 des Leitfadens) nicht berücksichtigt werden. Die Bemessung erfolgt übli-

cherweise auf der Basis von „worst credible“ - Szenarien (im Folgenden maßgebende Szenarien) und Annahmen, deren Randbedingungen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit auch während der gesamten Lebensdauer des Gebäudes eintreten können.

Aus der Vielzahl der denkbaren Brandszenarien müssen zur Eingrenzung der erforderlichen rechnergestützten Parameterstudien wenige herausgefunden oder neu konstruiert werden, die für die jeweiligen brandschutztechnischen Problemstellungen zu ausreichend sicheren Brandschutzkonzepten führen (design fire scenarios, Bemessungsbrand-Szenarien). Dabei können bestimmte Schlüssel-Ereignisse (wie das Öffnen von Türen und Fenstern oder der Beginn von Löschmaßnahmen) entweder als von der Branddauer unmittelbar abhängige Größen direkt oder in Abhängigkeit von anderen (berechneten) Kenngrößen (wie der Raumtemperatur) indirekt vorgegeben und als Rand- und Anfangsbedingungen verwendet werden.

Zu den diversen Bemessungsbrandszenarien müssen quantifizierte Brandverläufe als Bemessungsbrände (design fires) festgelegt werden. Dafür sind die entsprechenden physikalischen Kenngrößen zu beziffern. Das Datenmaterial dieses Kapitels dient als Grundlage für die objektspezifische Konkretisierung der anzusetzenden Brände durch den Sachverständigen.

Da diese Kenngrößen in die verfügbaren Rechenmodelle unterschiedlich implementiert worden sind, müssen die erforderlichen Daten im praktischen Gebrauch unter Umständen auf das verwendete Rechenprogramm hin angepasst werden (s. Kapitel 5).

Da das Brandgeschehen immer von einer Reihe von Einflussfaktoren, insbesondere durch die brennbaren Stoffe, die Art und Intensität der Zündung, die Raumkonfiguration und durch die Ventilation bestimmt wird, ist eine „exakte“ Vorhersage der Brandentwicklung praktisch nicht möglich. Gleichwohl lassen sich für die Beurteilung der Brandsicherheit in Gebäuden und für die Dimensionierung von bestimmten Brandschutzanlagen ausreichend qualifizierte Brandverläufe angeben, die im Rahmen von Parameterstudien mit den Methoden des Brandschutzingenieurwesens analysiert und den Berechnungen zu Grunde gelegt werden können. Anhaltswerte zur Herleitung objektspezifischer Bemessungsbrände sind im Anhang zu Kapitel 4 zusammengestellt.

Für die Interpretation der Ergebnisse ingenieurwissenschaftlicher Untersuchungen in Bezug auf das Erreichen der Schutzziele ist von entscheidender Bedeutung, dass die getroffenen Festlegungen der Bemessungsbrandszenarien und der Bemessungsbrände für die späteren Nutzungen als zulässige Obergrenzen beachtet werden müssen. Daher müssen die entsprechenden Annahmen auch im Hinblick auf die zeitlichen Veränderungen hinreichend konservativ festgelegt werden.

In Anhang 1 des Leitfadens werden die in diesem Kapitel verwendeten Begriffe sowie die Symbole und Einheiten erläutert.

4.2 Bemessungsbrandszenarien

4.2.1 Allgemeines

Die maßgebenden Bemessungsbrandszenarien werden mit Blick auf die Erreichbarkeit der festgelegten Schutzziele (s. Kap. 3) entwickelt und beschrieben. Dabei steht zunächst eine systematische Identifizierung der Brandgefahren mit anschließender Risikobewertung (s.

Kap. 10) im Vordergrund. Letztere bewertet die Auftretenswahrscheinlichkeit gefährlicher Szenarien (die Aktivierungsmöglichkeit der Brandgefahr) zusammen mit der erwarteten Ereignisfolge (dem anzunehmenden Schadenausmaß bezogen auf das Schutzziel). Im Rahmen der Festlegung von Bemessungs-Brandszenarien kommt bei dieser Risikobewertung Aspekten erhöhte Bedeutung zu, die unmittelbar mit den brennbaren Stoffen verknüpft sind. Zu diesen Aspekten zählen Fragen wie:

- Welche brennbaren Stoffe sind im betreffenden Raum zu erwarten und wie werden sie dort angeordnet bzw. gelagert?
- Wie leicht lassen sich diese brennbaren Stoffe entzünden und wie stark neigen diese Stoffe in der angenommenen Anordnung zum selbständigen Weiterbrennen?
- Welche Zündquellen bzw. welche Zündinitialen können auf diese Stoffe im Laufe des Betrachtungszeitraums einwirken?
- Welche Brandprodukte und welche Verbrennungswärme können diese Stoffe freisetzen?

In der Praxis wird üblicherweise davon ausgegangen, dass die Brandentstehungswahrscheinlichkeit wegen der nicht auf bestimmte Stellen dauerhaft festlegbaren Risikoparameter an allen Orten eines Raumes als gleich groß anzunehmen ist. Für besondere Untersuchungen kann von einer Festlegung der Nutzungsparameter (wie der Anordnung von brennbaren Stoffen oder von möglichen Zündquellen) Gebrauch gemacht werden und der Brandherd im Brandraum verortet werden. Im weiteren Verlauf eines Brandgeschehens können sich alle brennbaren Stoffe beteiligen. Im Einzelfall können Überlegungen zur Brandübertragung zwischen brennbaren Stoffen über brandlastfreie Bereiche erforderlich werden. Der Zeitraum von der Entzündung bis zum Beginn der Brandausbreitung wird in den Brandszenarien in der Regel vernachlässigt (siehe Bild 4.1).

Neben den anzunehmenden „Stoffeigenschaften“ bestimmen insbesondere die Verbrennungsbedingungen und Löschmaßnahmen wesentlich die Brandentwicklung. Mit den Verbrennungsbedingungen ist hier zunächst der verfügbare Luftsauerstoff in der Verbrennungszone gemeint. Bei den Löschmaßnahmen deren Aktivierungszeitpunkt in Bezug auf die bis dahin erreichte Brandgröße und Brandausbreitungsgeschwindigkeit sowie deren anzunehmende Effektivität in Bezug auf die Beeinflussung des Brandgeschehens.

Andere anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen wie insbesondere automatische Brandmeldeanlagen und Alarmierungsanlagen beeinflussen das Brandgeschehen unmittelbar nicht. Sie können sich allerdings auf den Aktivierungszeitpunkt manueller Löschmaßnahmen und somit mittelbar auch auf das Brandgeschehen auswirken. Der in der Brandschutz-Planung angenommene Nutzen dieser Brandschutzmaßnahmen wird vorwiegend im Bereich des Personenschutzes gesehen und im Rahmen dieses Leitfadens in den Kapiteln 8 und 9 verwendet.

Aus den verschiedenen, durch bauliche, anlagentechnische und organisatorische Randbedingungen und Maßnahmen beeinflussten, möglichen Brandszenarien müssen die Szenarien ausgewählt werden, die für die Bemessung im Hinblick auf ein nachzuweisendes Schutzziel relevant sind. Dabei spielt die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Szenarios (z. B. gesprinkelter/ungesprinkelter Brand), aber auch die mögliche Schadensschwere eine Rolle.

Für die Heißbemessung von Bauteilen bedeutet dies aufgrund der potenziellen Schadensschwere bei deren Versagen im Brandfall, dass zunächst vom Ausfall aller Löschmaßnahmen durch Personen vor Ort, der Feuerwehr oder Löschanlagen ausgegangen wird (Vollbrandszenario). Innerhalb der DIN 18230-1 und der DIN EN 1991-1-2/NA [4.22] wurden aber probabilistisch abgeleitete Sicherheitskonzepte eingeführt, mit deren Hilfe die brandschutztechnische Infrastruktur über Sicherheitsbeiwerte bei der Bestimmung der Bemessungsbrände berücksichtigt wird.

Für Nachweise der Personensicherheit ergeben sich die Bemessungsbrandszenarien als „Regelfall“ unter Berücksichtigung der planmäßigen physikalischen Wirkung der vorgesehenen / vorhandenen aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen.

Darüber hinaus sollen aber als anzunehmende, hinreichend wahrscheinliche „Ausfall-Szenarien“ auch Szenarien deterministisch analysiert werden, bei denen einzelne oder mehrere der vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen ausfallen und nicht bestimmungsgemäß funktionieren. Diese (zusätzlichen) Untersuchungen zeigen u. a. auf, wie robust die unter den „Regelfall-Bedingungen“ nachgewiesene Lösung auf den Ausfall einzelner Brandschutzmaßnahmen reagiert bzw. welchen Beitrag bestimmte Brandschutzmaßnahmen zur Erreichung des Schutzziels leisten.

Mit diesen „Ausfall-Szenarien“ lässt sich die Abhängigkeit der nachgewiesenen Lösung von einzelnen Brandschutzmaßnahmen beurteilen, was ggf. zu besonderen Anforderungen an deren Zuverlässigkeit führen kann - oder gar zu redundanten Maßnahmen. Erkenntnisse über diese seltenen Ereignisse können auch unter Anwendung entsprechend „schwächerer“ Leistungskriterien (als dann zulässige Grenzzustände) bewertet werden. Beispielsweise werden für die Nutzbarkeit der Rettungswege Beurteilungswerte für den „Regelfall“ - nach Kapitel 8.6 dieses Leitfadens - so „stark“ formuliert, dass die Grenzzustände mit einer „Behinderung der Flucht“ verknüpft werden. Für die „Ausfall-Szenarien“ dürfen „schwächere“ Grenzzustände herangezogen werden, die eine „Verhinderung der Flucht“ charakterisieren. Siehe hierzu auch Kapitel 10 - insbesondere Kapitel 10.5 (Hinweis: Ein normativ festgelegtes Sicherheitskonzept wie für die Heißbemessung steht derzeit noch nicht zur Verfügung; jedoch ist diese Methodik auch für die Bestimmung von Sicherheitsfaktoren für typische ASET/RSET-Betrachtungen geeignet, entwickelt und an Beispielen erprobt [4.50],[4.51]).

Ein Szenario, bei dem alle oder sehr viele der vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen ausfallen bzw. bei dem wesentliche Annahmen der Nachweisführung nicht zutreffen, ist grundsätzlich eine „worst-case-Annahme“, die wegen der äußerst geringen Auftretenswahrscheinlichkeit nicht für die Nachweisführung relevant - also nicht maßgebend - ist. Hängen jedoch alle bzw. sehr viele der vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen technisch so miteinander zusammen, dass der Ausfall einer Komponente des Sicherheitskonzeptes (z. B. die Stromversorgung) zum Ausfall vieler Maßnahmen führt, dann sind auch diese Fälle maßgebend und zu betrachten [4.52].

Aufgrund der Festlegungen der Bemessungsbrandszenarien ergeben sich Bemessungsbrände, die den rechnerischen Brandsimulationen zugrunde gelegt werden. Im Zuge der Berechnungen können Verhältnisse auftreten, die von den Grundannahmen der Bemessungsbrand-Szenarien abweichen. Daher müssen die Rechenannahmen der Bemessungsbrand-

Szenarien anhand der Rechenergebnisse überprüft werden. Gegebenenfalls sind dann Modifikationen des Bemessungsbrand-Szenarios erforderlich und erneute Berechnungen.

Beispiel: Das Bemessungsbrandszenario gibt einen bestimmten Typ für die Brandausbreitung vor. Es zeigt sich aufgrund der Temperatur in der Heißgasschicht, dass sich wegen der Wärmestrahlung von oben auch schon Gegenstände entzünden, die in größerer Entfernung vom aktuellen Brandgeschehen vorhanden sind. Dann muss der Typ der Brandausbreitung geändert werden (z. B. schnellere Brandausbreitung) und die entsprechenden Berechnungen ab diesem Zeitpunkt mit modifizierten Bedingungen wiederholt werden.

Windeinwirkungen auf die Gebäudeöffnungen sind wahrscheinlich. Innerhalb von Gebäuden kann durch den Windeinfluss das Strömungsfeld und die Ausbreitung von Brandprodukten beeinflusst werden. Dieser Effekt ist besonders zu beobachten in Gebäuden mit freien Öffnungen in Fassaden und Dachflächen bei Bränden und Brandphasen geringer Wärmefreisetzung, die in der Anfangsphase eines Brandszenarios vorkommen. Dies gilt insbesondere für Brandherde, die in der Nähe der Gebäudeöffnungen angeordnet werden und deren Plumes im direkten Einflussbereich der Zuluftströmungen liegen. Bei Szenarien mit großen Wärmefreisetzung (z. B. für die Bauteilbemessung) treten diese Einflüsse auf ein unbedeutendes Maß zurück und können in der Regel vernachlässigt werden [4.1].

Der Wind hat auf die Entwicklung des Quellterms nur einen geringen Einfluss und kann deshalb beim Quellterm in der Regel vernachlässigt werden.

4.2.2 Grundsätze zur Identifizierung der maßgeblichen Bemessungsbrandszenarien

Zur Identifizierung der maßgeblichen Bemessungsbrandszenarien aus der Vielzahl der denkbaren möglichen Brandszenarien werden im Folgenden Hilfestellungen gegeben, mit denen die Anzahl der mit rechnerischen Parameterstudien zu untersuchenden Brandszenarien eingeschränkt werden kann.

Automatische Brandmeldeanlagen (nicht Sprinkleranlagen), Alarmierungsanlagen, Informationssysteme oder Rauch- und Wärmeabzugsanlagen sind für den dynamischen Ablauf eines Brandszenarios von großer Bedeutung, beeinflussen jedoch normalerweise nicht die Festlegung des Bemessungsbrandes bis zu dem Zeitpunkt des Einsetzens aktiver Brandbekämpfungsmaßnahmen durch Einsatzkräfte. Diese Maßnahmen und technischen Einrichtungen sind jedoch wesentlich für die Bewertung der Brandkonsequenzen (verfügbare Fluchtzeit) und die Ermittlung der erforderlichen Fluchtzeit durch eine Personenstromanalyse, wie in den Kapiteln 8 und 9 beschrieben. Insbesondere die in Kapitel 9.3 beschriebene Systematik zur Bestimmung von Reaktionszeiten (Zeitspanne zwischen Brandausbruch und dem Beginn der eigentlichen Fluchtbewegung) nimmt explizit Bezug auf das Alarmierungssystem und das Brandschutzmanagement, zu dem gegebenenfalls auch ein Informationssystem zu zählen ist.

Folgende Einflussfaktoren sind bei der Identifizierung der maßgeblichen Bemessungsbrandszenarien mindestens zu berücksichtigen:

- a) Unveränderliche Parameter aus dem Objekt
 - Brandraumgeometrie,
- b) Variable Parameter

- Art (Brandlast, brennbare Stoffe), Größe und Lage des Brandherds,
- Zündquellen / Zündinitiale sowie Art und Lagerung der zuerst in Brand geratenen Stoffe / Gegenstände für die Betrachtung „lokaler Brandszenarien“
- Brandphasen (Brandentstehung / Vorbrennphase, Brandausbreitungsphase, lokal begrenzter voll entwickelter Brand, Vollbrand im Brandraum),
- Ventilations- und Öffnungsbedingungen,
- Auslösebedingungen aktiver (anlagentechnischer) Maßnahmen.

c) Sonderfälle (zu betrachten nur im Ausnahmefall)

- besondere Ereignisse / seltene und außergewöhnliche Ereignisse (z. B.: Brandstiftung mit mehreren Brandentstehungsorten und Brandbeschleuniger)
- Szenarien, bei denen vorgesehene Brandschutzmaßnahmen nicht oder nicht bestimmungsgemäß funktionieren

Abhängig von den Schutzzielkonkretisierungen und akzeptierten Schadensausmaßen sind unterschiedliche und angemessene Bemessungsbrand-Szenarien anzusetzen. Für die erste Orientierung kann folgende Zuordnung wesentlicher Szenarien-Merkmale zu den Schutzzielen verwendet werden:

- Personenschutz-Aspekte der Nutzer:

Phase der Vorbrennzeit wird in der Regel vernachlässigt und ist dann Bestandteil der Sicherheitskonzeption / zusätzliche Sicherheitsreserve, die nicht durch Brandsimulationen über die Zeit quantifiziert wird. Die wesentlichen Anforderungen an die Personensicherheit werden im Zusammenhang mit der Brandausbreitungsphase bewertet.

- Fremdrettung:

Das Erfordernis und der Umfang von Fremdrettungsmaßnahmen sowie die Konkretisierung der Schutzziele erfolgt im Brandschutzkonzept unter Beachtung objektspezifischer Kriterien. Hierauf ist unmittelbar Bezug zu nehmen. Es kommen Szenarien der Brandausbreitung im Nahbereich der zu rettenden Personen in Betracht, aber auch Vollbrandszenarien in anderen Gebäudeabschnitten.

- Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten durch die Feuerwehr:

Grundsätzlich gehen Brandschutzkonzepte bei der Bewertung der Wirksamkeit von manuellen Löschmaßnahmen vom Innenangriff der Feuerwehr aus. Die maximale Größe noch von den Feuerwehr-Einsatzkräften beherrschbarer Brände hängt von der Leistungsfähigkeit der Feuerwehr ab. Grundsätzlich muss für einen Innenangriff die Standsicherheit des Haupttragwerks der zur Brandbekämpfung benötigten Gebäudeteile sichergestellt sein (s. Standsicherheit).

- Standsicherheit und Raumabschluss im Brandfall:

Fort- und vollentwickelte Brände, die im Allgemeinen bei „kleinen“ Räumen als Vollbrände im ganzen Raum und bei „großen Räumen“ als lokal begrenzte Brände in Erscheinung treten.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

- Sachwertschutz:

Die Konkretisierung der Schutzziele hängt stark vom Einzelfall ab. Hierfür lassen sich keine allgemeingültigen Hinweise angeben.

In Vorbereitung einer rechnerischen Brandsimulation können die zu betrachtenden Bemessungsbrand-Szenarien durch eine systematische Bewertung der „variablen Parameter“ festgelegt werden. Zunächst werden auf der Basis erkannter Brandgefahren mögliche / denkbare Brandszenarien zusammengestellt und anschließend im Hinblick auf ihre angenommene Auftretenswahrscheinlichkeit und die daraus erwarteten, schutzzielbezogenen Schadenausmaße (beides in der Regel: expert judgement) bewertet. Dazu sind in der Regel für jedes Brandszenario folgende Aspekte zu bewerten:

1) Lage des Brandherdes auswählen

- Der Raum oder die Stelle in einem Raum wird ausgewählt, wo ein Brand ausbrechen kann, der große bzw. gefährliche Auswirkungen haben kann.
- In der Regel sind in einem Raum mehrere Brandentstehungsorte möglich und gleich wahrscheinlich. Dann wird einer davon festgelegt, der abdeckend für die anderen Brandorte ist. Ist das nicht möglich, müssen gegebenenfalls mehrere Brandentstehungsorte betrachtet werden. Dabei werden sogenannte maßgebende Szenarien gewählt.

2) Brandlast und Brandentstehung beschreiben

- Die in den Brand mit hoher Wahrscheinlichkeit involvierte Brandlast wird beschrieben (Art, Lage und Lagerung, Menge, Brandausbreitungsgefahr).
- Die Brandentstehung (Anfangs-Wärmefreisetzung zu Beginn der Brandausbreitungsphase) und ggf. die zuerst in Brand gesetzten Gegenstände werden festgelegt.
- Aus den Angaben ergeben sich für den Bemessungsbrand insbesondere die Wärmefreisetzungsrate und die Brandausbreitungsgeschwindigkeit.

3) Ventilationsbedingungen des Brandraumes beschreiben

- Öffnungen des Brandraumes (wie Fenster, Türen, RWA, etc.) werden im Hinblick auf ihre Öffnungsflächen bzw. auf ihre Leistungskriterien (Massenstrom), ihre Anordnung im Gebäude und einschließlich ihrer Öffnungsbedingungen beschrieben.

4) Art des Brandes

- Es wird die für das Ziel der Untersuchungen primär relevante Brandphase benannt und vorläufig¹ festgelegt, ob es sich um einen brandlastgesteuerten Brand (ausreichend Verbrennungsluft vorhanden) oder um einen ventilationsgesteuerten Brand handelt.

¹ Diese Festlegung wird während der Brandsimulationen überprüft und ggf. den sich im Verlauf des Geschehens geänderten Ventilationsbedingungen angepasst und geändert.

5) Einfluss der Anlagentechnik auf den Brandverlauf und das Brandszenario

- Bei Berücksichtigung anlagentechnischer Maßnahmen (z. B. automatische Feuerlöschanlagen wie Sprinklerung) ist eine Begrenzung der "ungestörten" Brandausbreitung möglich. Dazu müssen Kriterien für die Aktivierung dieser Anlagentechnik festgelegt werden und deren erwartete Auswirkungen auf das Brandereignis beschrieben werden.
- Der Ansatz anlagentechnischer Maßnahmen bei der Festlegung von Bemessungsbrand-Szenarien und eine hierdurch bewirkte Begrenzung der Brandverlaufskurven muss unter Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeiten der anlagentechnischen Systeme bewertet werden (s. Kap. 10). Es wird grundsätzlich von der erwarteten Wirksamkeit aller Sicherheitsmaßnahmen ausgegangen¹.

6) Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

- Die Berücksichtigung der Brandbekämpfungsmaßnahmen der Feuerwehr (Wirksamkeit der Brandbekämpfung) auf den Brandverlauf und das Eingreifen der Feuerwehr in das Bemessungsbrand-Szenario ist mit der zuständigen Brandschutzdienststelle in jedem Einzelfall abzustimmen.
- In der Regel lässt sich der Feuerwehreinsatz nicht in einem Zeitregime konkret festlegen, da sich die Entscheidungen der Einsatzleitung nach der tatsächlich örtlich vorgefundenen Lage und den tatsächlich verfügbaren Einsatzkräften und Einsatzmitteln richten müssen. Dies ist für ein Zeitregime nicht mit der erforderlichen Zuverlässigkeit festlegbar. Häufig können allerdings Planungsgrundsätze für den Feuerwehreinsatz für eine ingenieurtechnische Bewertung und Einbindung der Feuerwehr in Brandsimulationen verwendet werden (s. Kapitel 7).

7) Abschätzung des zu erwartenden Schadens

- Die zu erwartenden Brandfolgen / Schadensbilder des Brandszenarios sind zu beschreiben und zu bewerten.
- Gesamtbewertung und Auswahl des Bemessungsbrand-Szenarios
- Aus den betrachteten Brandszenarien werden ein oder ggf. auch mehrere Bemessungsbrand-Szenario / Bemessungsbrand-Szenarien ausgewählt. Mit ihnen sollen alle relevanten Brandszenarien auf der sicheren Seite abgedeckt sein.
- Kriterium für die Auswahl ist das erwartete Schadenausmaß über die Lebensdauer des Gebäudes. Dabei werden – gedanklich – die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Ereignisse mit den erwarteten Schadenshöhen multipliziert. Dies

¹ Die Berücksichtigung des Ausfalls von Sicherheitseinrichtungen ist Gegenstand des Sicherheitskonzeptes und der Risikoanalyse. Hieraus ergeben sich andere Szenarien, die für bestimmte Fragestellungen ebenfalls relevant und berechenbar sind (Sicherheitskonzept, Risikoanalyse).

geschieht in der Regel auf der Grundlage von verfügbarem Expertenwissen / Einschätzungen („expert judgement“), wobei auch systematische Verfahren der Risikobewertung zum Einsatz kommen können (s. Kap. 10).

4.2.3 Bemessungsbrandszenarien für die Benutzbarkeit der Rettungswege

Die Sicherheit von Personen wird zunächst von den Zuständen während der Brandausbreitungsphase bestimmt. Dabei wird von einer Selbstrettung der Personen über die vorgesehenen Rettungswege ausgegangen.

Im beurteilungsrelevanten Zeitraum finden gleichzeitig eine Brandausbreitung und die Räumung statt. Ziel ist die Überprüfung der Kriterien zum Nachweis der Personensicherheit (siehe Kapitel 3 und Kapitel 8).

Für die Beurteilung der Personensicherheit sind in der Regel mehrere Szenarien zu untersuchen. Als Ventilationsbedingungen sollten sowohl unterventilierte Brände mit niedriger Wärmefreisetzungsrate als auch ausreichend ventilierte Brände mit hoher Wärmefreisetzungsrate berücksichtigt werden.

4.2.4 Bemessungsbrandszenarien für die Fremdrettung durch die Feuerwehr

Die Fremdrettung durch die Feuerwehr stellt nur für Gebäude mit „kleinem Brandrisiko“ für deren Nutzer ein planbares Ereignis dar. Typisches Beispiel ist die Räumung von nicht unmittelbar betroffenen Wohnungen oder Hotelzimmern über verrauchte Flure oder über Leitern mit Unterstützung der Feuerwehr.

Grundsätzlich kann dieser Fremdrettungsprozess nur für solche Gebäudeteile in der Brandschutz-Planung als Maßnahme konzeptionell vorgesehen werden, die selber nicht unmittelbar vom Brand betroffen sind, also für Nutzungseinheiten und Gebäudeteile, in denen sich der Brandherd nicht befindet.

Für die Durchführung von Fremdrettungsmaßnahmen sind Randbedingungen erforderlich, die mit Ingenieurmethoden überprüft werden können. Für die Nutzbarkeit von Fluren sind beispielsweise die Feuerwiderstandsdauer der Flurwände und deren Decken (Unterdecken) oder die Brennbarkeit deren Baustoffe wesentlich. Für die Nutzbarkeit anleiterbarer Stellen ist ein möglicher Austritt von Feuer und Rauch aus Gebäudeöffnungen in nahe gelegenen Fassadenbereichen zu bewerten.

Die hierfür geeigneten Bemessungsbrandszenarien sollten von einem Vollbrand oder von einem Brandereignis in einer „anderen“ Nutzungseinheit (oder Geschoss, Brandabschnitt) ausgehen, dass sich bereits über einen längeren Zeitraum (ggf. zu einem Vollbrand) entwickeln konnte.

4.2.5 Bemessungsbrandszenarien für die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

Grundsätzlich erfordern wirksame Löschmaßnahmen der Feuerwehr ausreichende Bedingungen für einen Innenangriff. Ob ein Innenangriff noch erfolgreich durchgeführt werden kann, hängt u. a. von der Erreichbarkeit des Brandherdes und von dessen Ausdehnung, Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie von der Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt des Eintreffens am

Brandort ab. Wegen der Leistungsgrenzen der Feuerwehr werden zur Unterstützung bzw. Ermöglichung wirksamer Löschmaßnahmen häufig automatische Feuerlöschanlagen eingesetzt und / oder bauliche Abtrennungen angeordnet.

Für eine realitätsnahe Abschätzung, ob diese Einsatzgrenzen der Feuerwehr von einem realen Brand überschritten werden, ist es erforderlich, entsprechende Brandszenarien näher zu untersuchen.

Das „worst-credible scenario“ ist dazu in Bereichen festzulegen, in denen hohe Brandlasten vorhanden sind. Bei der Bewertung der möglichen Brandentstehungsorte sind außerdem die Entzündlichkeit der brennbaren Stoffe sowie deren Abbrandverhalten und die zu erwartende Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu beachten.

4.2.6 Bemessungsbrandszenarien für die Bauteil- bzw. Tragwerksbemessung

Bauteile mit Anforderungen an die Standsicherheit sollen im Brandfall dem Brandangriff über einen angemessenen Zeitraum widerstehen und standsicher bleiben. Raumabschließende Bauteile sollen die Brandausbreitung verhindern und keine Öffnungen freigeben oder so stark durchwärmen, dass an der dem Feuer abgekehrten Seite Entzündungstemperaturen für brennbare Stoffe auftreten. Zunächst erfolgt die Festlegung der Bauteile, für die eine Brandschutzbemessung erforderlich ist. Für diese ist dann neben der Temperaturbeanspruchung auch die statische Beanspruchung (Lastausnutzung bei tragenden Bauteilen, statisches System mit Randbedingungen) zu berücksichtigen (Ingenieuraufgabe am konkreten Objekt).

Für die Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens von Bauteilen kommen Brandszenarien in Betracht, bei denen sich der Brand schon stark - in der Regel zum Vollbrand - entwickelt hat. Die Brandeinwirkung setzt sich aus Strahlungsanteilen der Flammen und aus der Temperatur der Heißgase am Bauteil zusammen. Beurteilungsrelevant sind Szenarien mit stark entwickelten Bränden über die Dauer bis zum völligen Ausbrand oder bis zum Erreichen eines in der Schutzzielefestlegung vorgegebenen Ereignisses.

Es werden in der Regel Vollbrände oder lokal begrenzte Brände untersucht, die alle Brandlasten in der engeren Umgebung der zu beurteilenden Bauteile betreffen.

Für Bauteile im Deckenbereich wie z. B. Unterzüge ist i. d. R. die Heißgastemperatur bemessungsrelevant. In größeren Räumen ($> 400 \text{ m}^2$) ist die lokale Beanspruchung im Plume-Bereich zu berücksichtigen. Für Stützen ist in der Brandanfangsphase die Plume-Temperatur bzw. Flammentemperatur im Bereich des Brandherdes maßgebend. In größeren Räumen ($> 400 \text{ m}^2$) wird die Heißgastemperatur für die Bemessung von Stützen und Trägern maßgebend, sobald die Brandlast im Bereich der Stützen abgebrannt ist.

Bei sehr großen und/oder hohen Räumen - wie bei großen Industriehallen und Atrien - ist die mittlere Heißgastemperatur im Deckenbereich nicht bemessungsrelevant für die Standsicherheit und den Raumabschluss der Bauteile im brandnahen Bereich. Hierfür müssen lokale Temperaturen und Strahlungseinwirkungen (z. B. aus einer Plume-Berechnung oder CFD-Simulation) verwendet werden.

Eine wesentliche Einflussgröße für die Temperaturen im Brandraum sind die Ventilationsbedingungen. Für die Ermittlung der maßgeblichen Ventilationsbedingungen sind als mögliche Öffnungen des Brandraumes alle Fenster und Türen des Brandraumes zu berücksichtigen,

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

wobei die Öffnungsbedingungen so festgelegt bzw. variiert werden sollen, dass sich die maximale Brandeinwirkung auf die Bauteile ergibt.

Als Ventilationsöffnungen sollten nur Öffnungen in Rechnung gestellt werden, die unmittelbar ins Freie führen. Türen sollten als Ventilationsöffnung angesetzt werden, wenn sichergestellt ist, dass sie ins Freie oder zu einem Raum mit ausreichender Zulufführung führen.

Durch das brandbedingte Versagen von Fensterflächen können die Ventilationssteuerung und der daraus resultierende Bemessungsbrand erheblich beeinflusst werden.

Der Zeitpunkt des Versagens einer Verglasung hängt u. a. von Temperaturdifferenzen, Spannungen innerhalb des Glases, Breite und Höhe der Scheibe, Perfektionsgrad der Fertigung (Mikrorisse), Rahmenart, Lagerung und Dicke der Scheibe, Anzahl der Scheiben (Einfach- oder Mehrfachverglasung) sowie der thermischen Beanspruchung (schockartig oder gleichförmig) ab. Zudem bedeutet ein Bruch der Scheibe nicht, dass diese auch vollständig als Ventilationsöffnung zur Verfügung steht. Da eine Abschätzung des brandbedingten Versagens von Fensterflächen, z. B. anhand der Temperatur, nur bedingt möglich ist, erscheint eine konservative und schutzzielorientierte Annahme des Freiwerdens von Ventilationsöffnungen angemessen.

Bei der Ermittlung von Naturbrandeinwirkungen auf Tragwerke können verschiedene Ventilationsbedingungen relevant sein. So ist bei freiliegenden Stahlträgern vor allem die Höhe der maximalen Temperatur ausschlaggebend (brandlastgesteuerter Brand), während für bekleidete Stahlbauteile und Stahlbetonbauteile die Dauer der Brandeinwirkung relevant ist (ventilationsgesteuerter Brand). Daher kann es unter Umständen erforderlich sein, eine Variation der Ventilationsbedingungen im Rahmen einer Parameterstudie zu untersuchen. In der Regel liefert die Öffnungsfläche im Übergang zwischen ventilations- und brandlastgesteuertem Brand, für die Bemessung von Bauteilen, die konservativsten Ergebnisse.

Aus Brandversuchen z. B. [4.4], [4.5] können Anhaltswerte für Brandraumtemperaturen nahe der Verglasungen ingenieurtechnisch grob ableitet werden, bei denen Verglasungen so versagen, dass anrechenbare Ventilationsöffnungen freigegeben werden. Die Größenordnung solcher zerstörenden Raumtemperaturen ergibt sich daraus in etwa folgendermaßen:

- Einfachverglasungen (3 mm) 300 °C bis 360 °C
- Einfachverglasungen (4 - 6 mm) 450 °C
- Doppelverglasungen 600 °C
- Doppelverglasungen; PVC-Rahmen 550 °C (nach 30 Minuten Einwirkung)
- Doppelverglasungen: Holzrahmen 550 °C (nach 60 Minuten Einwirkung)
- Dreifachverglasung, Holzrahmen 730 °C (nach 30 Minuten Einwirkung)

Die Ergebnisse zeigen, dass bei moderner Bauweise nicht davon auszugehen ist, dass Fensterflächen frühzeitig zur Rauch- und Wärmeableitung zur Verfügung stehen.

In wie weit eine Brandbekämpfung bei der Festlegung des Bemessungsszenarios berücksichtigt werden kann, ist eine Frage des Sicherheitskonzepts (s. Kapitel 10). Auslösezeiten von

anlagentechnischen Maßnahmen und Eingriffszeiten der Feuerwehr sind nach Kapitel 7 zu bestimmen.

4.2.7 Brandszenarien zur sachschutztechnischen Risikobewertung

Im Rahmen einer Gefährdungsanalyse mit anschließender Risikobewertung werden die Schutzziele zum Sachwertschutz danach beurteilt, durch welche typischen Brandereignisse sie besonders gefährdet werden. Infrage kommen insbesondere folgende Schadensbilder:

- Schäden an Gerätschaften, Produktionsmitteln oder von Werkstoffen bzw. Produkten durch eine unmittelbare Beaufschlagung durch Brandrauch, beispielsweise durch Verunreinigungen oder durch Korrosionsschäden,
- Schäden an Gerätschaften, Produktionsmitteln oder von Werkstoffen bzw. Produkten durch unmittelbare thermische Brandeinwirkungen,
- Schäden an betriebswichtigen Einrichtungen (Bottleneck),
- Schäden durch Versagen oder durch erheblichen Reparaturaufwand von Gebäudeteilen,
- Schäden infolge einer brandbedingten Betriebsunterbrechung,
- Schäden an Gerätschaften, Produktionsmitteln oder von Werkstoffen bzw. Produkten durch großflächige oder sehr intensive Maßnahmen zur Brandbekämpfung, beispielsweise durch das Löschwasser,
- Schäden durch Imageverluste der Firma.

Die Brandszenarien werden schutzzielentsprechend auf die festgestellten Hauptgefahren abgestellt, beispielsweise auf:

- Brandentwicklungen mit bereits frühzeitig einsetzender, erheblicher Rauchentwicklung,
- Brandentwicklungen mit hoher Brandausbreitungsgeschwindigkeit und Wärmefreisetzungsrate,
- Brandentwicklungen mit großer Wärmefreisetzungsrate in der Nähe zu schützender Güter,
- Brandentwicklungen, die zu einem Versagen oder zu einer erheblichen Schädigung größerer Teile des Gebäudes führen können,
- Lokale Brände mit dem Potenzial für stark überproportionale Schäden bzw. Brandfolgen.

Die Analyse der Szenarien gibt ggf. bereits im Stadium einer qualitativen Bewertung Aufschluss darüber, ob die erwarteten Brandwirkungen besondere Schutzmaßnahmen zum Erreichen der Schutzziele erfordern. Durch rechnerische Untersuchungen lassen sich auf der Basis der erwarteten Brandwirkungen die Entscheidungen über zusätzliche oder besondere Brandschutzmaßnahme weiter absichern.

4.2.8 Sonderfragen

4.2.8.1 Lokale Brände (Begrenzung der Brandausbreitung)

Die Brandausbreitung kann durch folgende Maßnahmen wirksam begrenzt werden:

- Wirksame Löscharbeiten sind erfolgreich und verhindern eine weitere Brandausbreitung.
- Ein Beispiel für ein solches Vorgehen sind die Bemessungsbrände zur Auslegung von natürlichen und maschinellen Rauchabzugsanlagen in DIN 18232.
- In gleicher Weise können auch automatische Löschanlagen berücksichtigt werden. In DIN 18 232 wird als Beispiel dafür eine maximale Brandfläche von 20 m² angenommen.
- Durch Wände oder Einbauten wird eine direkte Brandausbreitung über diese hinaus (zumindest für einen gewissen Zeitraum) verhindert.
- Als Beispiel dafür kann eine Wand dienen, die ohne Anforderungen an eine Feuerwiderstandsklasse errichtet wurde (z. B. Blechwand als Rauchschutz). Eine weitere Brandausbreitung über dieses Hindernis hinaus kann erst stattfinden, wenn z. B. auf der Rückseite der Wand eine Temperatur erreicht wird, die zu einer Entzündung der dahinter angeordneten brennbaren Stoffe führen kann.
- Zwischen brennbaren Stoffen werden brandlastfreie Streifen (Freistreifen) mit einer Breite angeordnet, die eine weitere Brandausbreitung darüber hinaus verhindert (siehe z. B. DIN 18 230-1; Anhang A - in Verbindung mit anderen Maßnahmen).
- Als Kriterium für den Nachweis, dass eine Entzündung von Brandlasten jenseits der Freistreifen nicht stattfindet, wird eine kritische Wärmestromdichte (für eine spontane Entzündung) bzw. eine kritische Temperaturerhöhung (Entzündungstemperatur) an den Stoffen verwendet.

Für die Brandentstehung und die Ausbreitung auf der Teilfläche gelten die gleichen Voraussetzungen und Modelle wie für Brände ohne Begrenzung der Brandausbreitung.

4.2.8.2 Berücksichtigung von Wind- und Luftströmungen bei Brandsimulationen

Die Relevanz einer Berücksichtigung von Windeinflüssen in Überlagerung mit der außergewöhnlichen Einwirkung Brand kann mit den Methoden des Kapitels 10 geprüft werden.

Die Entscheidung über die Berücksichtigung des Windeinflusses muss im Einzelfall mit den am Projekt Beteiligten getroffen werden.

Infrage kommen hierfür ggf. in folgende Fälle:

- Ablenkung der Flamme außerhalb von Gebäuden durch Querwindeinfluss, z. B. bei der Beurteilung brennbarer Fassaden oder bei der Bemessung von Bauteilen vor der Fassade,

- Störung der Rauchgasschichtung und der Rauchableitung, z. B. bei Nachweisen zur Ermöglichung der Personenrettung und/oder wirksamer Löscharbeiten.

Windströmungen können für die Rauchableitung aus Räumen und insbesondere für die Bildung stabiler Rauchschiebungen

- wesentlich sein beispielsweise bei windabhängigen Entrauchungskonzepten wie bei einer windexponierten Lage natürlicher Zuluft- und/oder Entrauchungsöffnungen (z. B. Öffnungen in Seitenwänden),
- von untergeordneter Bedeutung sein für windunabhängige Konzepte mit einer mechanischen Entrauchungsmaßnahmen und entsprechender Zuluftführung.

Bei der Berücksichtigung von Windströmungen sollte folgende Punkte beachtet werden:

- Untersuchung vor allem für die ortsnahe Hauptwindrichtung,
- Vergleich der Ergebnisse mit Simulationen ohne Windeinfluss,
- Die Festlegung der Windwirkungen (Windrichtung, Windstärke) sollte aus entsprechenden ortsnahen Windmessungen abgeleitet werden. Da sowohl der Bemessungsbrand als auch ein bestimmtes Windereignis eher seltene Zufallsgrößen sind, sind für das gleichzeitige Auftreten beider Ereignisse deren Auftretenswahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Da der Bemessungsbrand bereits „konservativ“ festgelegt wird, sind besonders große und entsprechend seltene Windlastfälle in der Gleichzeitigkeit eher nicht sicherheitsrelevant für die Schutzziele der Rauchableitung.

4.3 Bemessungsbrände

4.3.1 Der Brandverlauf und Grundsätze seiner Modellierung

4.3.1.1 Allgemeines

Neben der qualitativen Beschreibung der Brandszenarien und der Brandentstehungsorte ist eine quantitative Vorgabe der Brandentwicklung erforderlich. Sie beschreibt die wesentlichen Brandparameter in ihrer zeitlichen Entwicklung. Die verschiedenen Brandentwicklungsstadien eines „natürlich“ verlaufenden Brandes (ohne äußere Einwirkungen durch Löschmaßnahmen) sind in Bild 4.1 dargestellt.

Der Bemessungsbrand ist in der Regel ein theoretischer – aber durchaus möglicher – Brandverlauf, der eine Vielzahl denkbarer Brandverläufe auf der sicheren Seite abdeckt. Der Bemessungsbrand muss nicht zwingend alle denkbaren und möglichen Brandereignisse auf der „sicheren Seite“ mit abdecken. Er muss allerdings die aus den Bränden resultierenden Gefahren in ihrer Gesamtheit hinreichend sicher erfassen. Im Rahmen der „Brandsimulation“ wird geprüft, ob die im Bemessungsbrand festgelegten Vorgaben physikalisch möglich sind; ggf. werden die Vorgaben dann durch realistische Werte ersetzt (und dokumentiert).

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Im Rahmen der Erarbeitung von Brandschutzkonzepten wird von der Annahme ausgegangen, dass der Brand nur an einer Stelle im Gebäude beginnt¹. Brandübertragungen auf andere Objekte sind zu berücksichtigen.

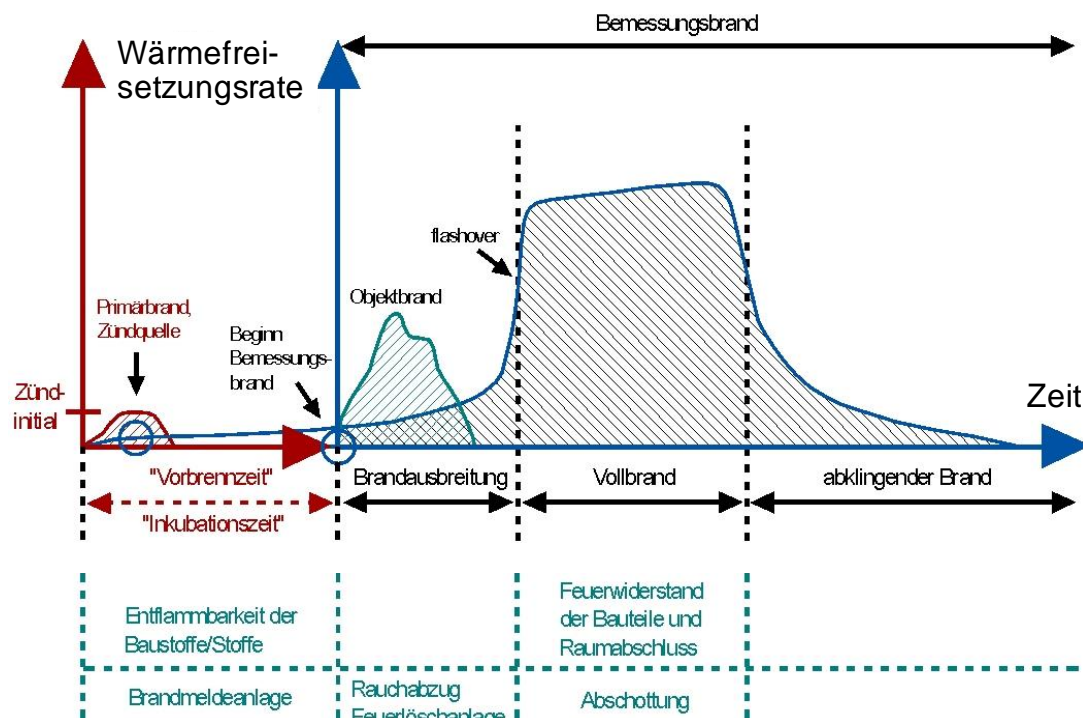


Bild 4.1 Brandentwicklungsphasen beim "natürlichen Brand" (Schematischer Verlauf der Wärmefreisetzungsrates)

Die zeitlichen Verläufe für die Wärmefreisetzungsrates und für die Freisetzung von Verbrennungsprodukten werden auch als „Quellterme“ bezeichnet.

Der Bemessungsbrand beginnt mit der Ausbildung einer stabilen Flamme. Bei der Aufstellung/Ableitung des Bemessungsbrandes müssen die Phänomene und Entwicklungen des Brandes vorausschauend analysiert werden. Einfluss auf den Brandverlauf nehmen:

- die Art der Zündung (Initial, Material),
- brennbare Stoffe, Art und Verteilung,
- charakteristische Stoffdaten zu Abbrandverhalten, Rauchpotentialen, Packdichte, Nutzung,
- Brandlast,
- mögliche Brandfläche bzw. Brandausdehnung,
- Raumgeometrie einschließlich Öffnungen,
- Ventilationsöffnungen, Öffnungswirkung eventuell zeitlich abgestuft,
- Flashover-Bedingungen,

¹ Sonderfall Brandstiftung: siehe „Bemessungs-Brandszenarien für Sachwertschutzaufgaben“

- wärmespezifische Parameter der Bauteile,
- Verbrennungsprozesse außerhalb des Raumes (Flammen außen vor den Öffnungen), die in der Wärmebilanz für den Brandraum berücksichtigt werden müssen,
- insgesamt freisetzbare Energie.

Der „Bemessungsbrand“ stellt die zeitabhängige Freisetzungsrates von Wärme und von Brandprodukten dar. Wichtige Kenngrößen, die für die Beschreibung des Bemessungsbrandes verwendet werden können, sind in Tabelle A4.1 des Kapitelanhangs zusammengefasst.

Bei ventilationsgesteuerten Bränden kann sich insbesondere die Freisetzungsrates von Brandprodukten gegenüber einem brandlastgesteuerten Brand erheblich verändern (s. Kap. 8). Bei mit dem Quellterm vorgegebener Wärmefreisetzungsrates ist das Brandregime während der Berechnungen kontinuierlich bzw. im Nachgang der Berechnungen separat unter Beachtung des globalen oder lokalen Sauerstoffangebotes zu kontrollieren.

Die Mengenanteile der Brandprodukte am Abbrand (g/g oder Vol.%/g) werden wie „stoffspezifische Kennwerte“ behandelt, wobei in der Regel lediglich eine Abhängigkeit von dem Brandregime¹ berücksichtigt wird. Unter dieser Modellannahme wird aus der Wärmefreisetzungsrates unter Berücksichtigung der Festlegungen hinsichtlich der Art der Brandlasten über den gemittelten Heizwert direkt auf die Freisetzungsrates der Brandprodukte geschlossen.

Damit kann die Wärmefreisetzungsrates („heat release rate -HRR-“) in Verbindung mit der Art der Brandlasten als zentrale Informationsquelle herangezogen werden. Von der Wärmefreisetzungsrates lässt sich dann im Regelfall die Entstehung weiterer Brandprodukte inklusive von Rauchpartikeln ableiten.

4.3.1.2 Wärmefreisetzungsrates

Die Wärmefreisetzungsrates kann auf unterschiedliche Weise festgelegt werden, z. B.:

- a) durch Experimente (ähnliche Brandlast bei ähnlichen Raum- und Ventilationsbedingungen),
- b) durch Berechnungen,
 - Nachbildung der Brandentwicklung und -ausbreitung mit Hilfe eines Ausbreitungs- und Verbrennungsmodells (bedingt möglich)
 - Berechnung der Brandentwicklung (Brandausbreitung und Feuerübersprünge) durch Berechnung von Erwärmung, Pyrolyse und Zündung weiterer Brandlasten, ausgehend von einer kleinen Primärbrandstelle (noch in der Entwicklung, für breite Anwendungsfälle noch nicht abgesichert)
- c) durch Vereinbarung auf der Basis von Schadenauswertungen oder anderer Erkenntnisse,

¹ brandlastgesteuerter oder ventilationsgesteuerter Brand

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

- Verwendung von in der Literatur genannten fertigen Bemessungsbrandkurven für Spezialfälle (z. B. brennendes Sofa) – Vorsicht: Vergleichbarkeit der Randbedingungen beachten
- d) durch normative Vorgaben und technische Regelwerke,
- Bemessung nach vereinfachten theoretischen Ansätzen unter Nutzung von Kennwerten aus der Literatur (wie z. B. q , H_i , \dot{m} , v_{aus}) - bei ausreichendem Datenmaterial wird Gegenrechnen mit verschiedenen Ansätzen empfohlen.

4.3.1.3 Bemessungsbrände aufgrund von objektspezifischen Brandversuchen

Brandversuche unter realitätsnahen Randbedingungen sowohl hinsichtlich der Brennstoffe als auch im Hinblick auf die Raumkonfiguration und auf die Ventilationsverhältnisse lassen sich messtechnisch so erfassen, dass die Eingangsparameter und Eingangsdaten für Brandsimulationen für den zu beurteilenden Einzelfall realitätsnah beschrieben und angegeben werden können.

Für die Verwendung veröffentlichter Messwerte aus Brandversuchen ist die Kenntnis der genauen Versuchsrandbedingungen, insbesondere der Anordnung der brennbaren Stoffe und der Ventilationsverhältnisse, von besonderer Bedeutung. Da in der Regel die Randbedingungen der Versuche entweder nicht vollständig bekannt sind oder vom zu beurteilenden Objekt abweichen, ist im Allgemeinen eine ingenieurgemäße Übertragung des veröffentlichten Zahlenmaterials auf die objektspezifischen Randbedingungen erforderlich.

Erkenntnisse hinsichtlich des Abbrandes einzelner Gegenstände unter Luftüberschussbedingungen lassen sich rechnerisch zu sich ausbreitenden Brandverläufen zusammensetzen, solange brandlastgesteuerte Brandbedingungen (Luftüberschuss) gegeben sind.

4.3.1.4 Bemessungsbrände durch unmittelbare Vorgabe von Brandeinwirkungen

Wichtig sind die Auswahl der entscheidenden Brandparameter und der zu untersuchenden Brandentwicklungsphasen. Hierzu sollte eine Einigung aller am Bau beteiligten Stellen herbeigeführt werden.

In der Brandschutzpraxis werden allerdings auch häufig bestimmte Brandparameter direkt als direkte Bemessungsbrand-Vorgaben verwendet – beispielsweise die Temperaturentwicklung im Brandraum (z. B. die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)) zur Auslegung von baulichen Brandschutzmaßnahmen. Als Quelle für entsprechende Festlegungen eignen sich in diesen Fällen beispielsweise die Testbrände von Normprüfverfahren.

4.3.1.5 Brände einzelner Gegenstände

Eine typische Anwendung für Brandsimulationen ist die Analyse von Bränden einzelner Gegenstände.

Das Brandverhalten von zu beurteilenden Gegenständen kann im Allgemeinen nicht theoretisch abgeleitet werden. Es muss bei Bedarf experimentell ermittelt werden. Dabei kommt es u. a. darauf an, sowohl die betreffenden Gegenstände selber als auch die Bedingungen des Brandraumes (Ventilation und Größe) realitätsnah im Versuchsaufbau darzustellen. Ebenfalls

ist die Art der Zündung / der Brandentstehung (Zündinitial) von großer Bedeutung auf den experimentellen Verlauf des Brandgeschehens.

Bei der Verwendung publizierter Brandverlaufskurven müssen die experimentellen Randbedingungen mit dem Anwendungsfall abgeglichen werden.

4.3.1.6 Normativ geregelte Zündinitialien

Die Wärmefreisetzungsrate und die daraus resultierende Brandwirkung eines Zündinitials auf „vorhandene Brandlasten“ ist entscheidend dafür, ob sich ein lokaler Brand entwickelt und wie schnell er sich in der Brandentstehungsphase zu einem sich selbständig ausbreitendem Brand weiterentwickelt. Die Berücksichtigung der lokalen Brandentwicklung ist dann von Bedeutung, wenn Details des Brandverlaufs von Bedeutung sind.

Die experimentell gewonnenen Erkenntnisse über das Brandverhalten von Gegenständen sind für spezifische Zündinitialien ermittelt worden und gelten nicht für alle Zündinitialien. Beispielsweise unterscheidet sich das Brandverhalten von Einrichtungsgegenständen erheblich, wenn anstatt von Zündinitialien mit geringer Wärmefreisetzungsrate solche mit hoher Wärmefreisetzungsrate verwendet werden.

Das Zündinitial wird in der Regel als „ortsfremder Körper“ aufgefasst und stellt die Verbindung zwischen der Zündquelle und den nutzungsspezifischen Brandlasten her. In Tabelle 4.1 ist eine Auswahl von normativ geregelten Zündinitialien mit der Angabe der zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrate gegeben.

Tabelle 4.1 Auswahl von normativ geregelten Zündinitialien

Zündinitial	Wärmefreisetzungsrate Zeit - Bezug	Quelle
Kleine offene Flamme	0,05 bis 0,5 kW für 30 s	UL 94
Zeitungspapier / Abfall	7 kW für 3 Minuten	DIN EN 45545-1 Anhang A / UIC 564-2 (Papierkissen)
Einzelner brennender Gegenstand, z. B. Papierkorb	30 kW für 20 Minuten	DIN EN 13823 (SBI)
Reisegepäck / -tasche	75 kW für 2 Minuten und 150 kW für weitere 8 Min.	DIN EN 45545-1 Anhang A
	120 kW bis zur 5. Minute und 150 kW bis zur 8. Minute	TRStrab Brandschutz
Holzkruppe (200 kg Fichtenholz, Grundfläche ca. 1,2 m ²)	bis zu 3.000 kW nach [4.8]	MVV TB Anhang 5 Sockelbrandprüfverfahren

4.3.2 Ansätze für Bemessungsbrände

4.3.2.1 t²-Modell für die Brandentwicklungsphase

Das t²-Modell dient vorwiegend zur Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung bei geringer Bestimmtheit der Brandbedingungen mit normativen Ansätzen und findet im internationalen Bereich große Anwendung.

Wenn von den Brandlasten keine zuverlässigen Erkenntnisse über deren Abbrandeigenschaften (Abbrandgeschwindigkeit) verfügbar sind, müssen pauschale Annahmen auf der sicheren Seite liegend getroffen werden. Da in der Regel die Berechnungen für eine größere Bandbreite von Nutzungsmöglichkeiten und Brandlasten gelten sollen, ist diese Vorgehensart eine häufig verwendete.

In die internationale Normung hat folgende Vorgehensweise Eingang gefunden (siehe Bild 4.2 und Tabelle 4.2 und

Tabelle 4.3):

- Es werden verschiedene Brandentwicklungen klassifiziert, z. B.: langsam, mittel, schnell und sehr schnell.
- Die charakteristischen Brandentwicklungen sind notwendigerweise idealisierte Werte, basieren allerdings auf wissenschaftlichen Untersuchungen unter Verwendung von Tests und aus der Auswertung realer Schadenfeuer. Sie wurden im Hinblick auf den Personenschutz in den USA festgelegt (siehe NFPA 92B [4.14]).
- Die Brandentwicklung wird mit einem t²-Ansatz beschrieben:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (4.1)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad (4.2)$$

mit

\dot{Q} Wärmefreisetzungsrate [kW],

\dot{Q}_s Wärmefreisetzungsrate [kW] zum Zeitpunkt t₀, an dem der Entstehungsbrand vom Objektbrand in einen sich über das Objekt ausbreitenden Brand übergeht (Beginn Bemessungsbrand, siehe Bild 4.1),

\dot{Q}_0 = 1000 kW,

α Brandentwicklungsfaktor [kW/s²]

t Branddauer ohne Berücksichtigung der Zündphase / Schwelbrandphase [s]

t_α charakteristische Brandentwicklungszeit; der Zahlenwert entspricht der Branddauer in [s] bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzungsrates von 1 MW

Die mit der t^2 -Funktion bestimmte Kurve wird beim Eintritt eines Flashovers verlassen und die Brandverlaufskurve steigt bis zum maximalen Wert gem. Gleichung (4.24) an.

Die Brandverlaufskurve muss über die vorhandene Brandlast kontrolliert werden (siehe Kapitel 4.3.3.4).

Die auf diese Weise festgelegten Brandverläufe charakterisieren sich jeweils durch eine konstante flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m²] auf eine kreisförmige Brandfläche bezogen. Der Kreisradius wächst linear mit der Zeit. Voraussetzung für die Anwendung der nachfolgenden Tabellen ist eine ausreichende Luftzufuhr. Deswegen gilt diese Gleichung, wenn sie für ventilationsgesteuerte Raumbrände verwendet wird, nur bis zur Einleitung des Flashovers.

Für lokale Brände in großen Hallen ist die Anstiegskurve der Wärmefreisetzungsrate beendet, wenn die maximale Wärmefreisetzung bezogen auf diese begrenzte Brandfläche erreicht ist.

Der Parameter α kennzeichnet den Anstieg der Wärmefreisetzungsrate. Eine entsprechende Darstellung der Brandentwicklung für charakteristische Werte der Steuergröße für die Wärmefreisetzungsrate ist in Bild 4.2 gegeben. Eine Zuordnung der gestuften Brandentwicklung zu t_α bzw. α findet sich in Tabelle 4.2 bzw.

Tabelle 4.3.

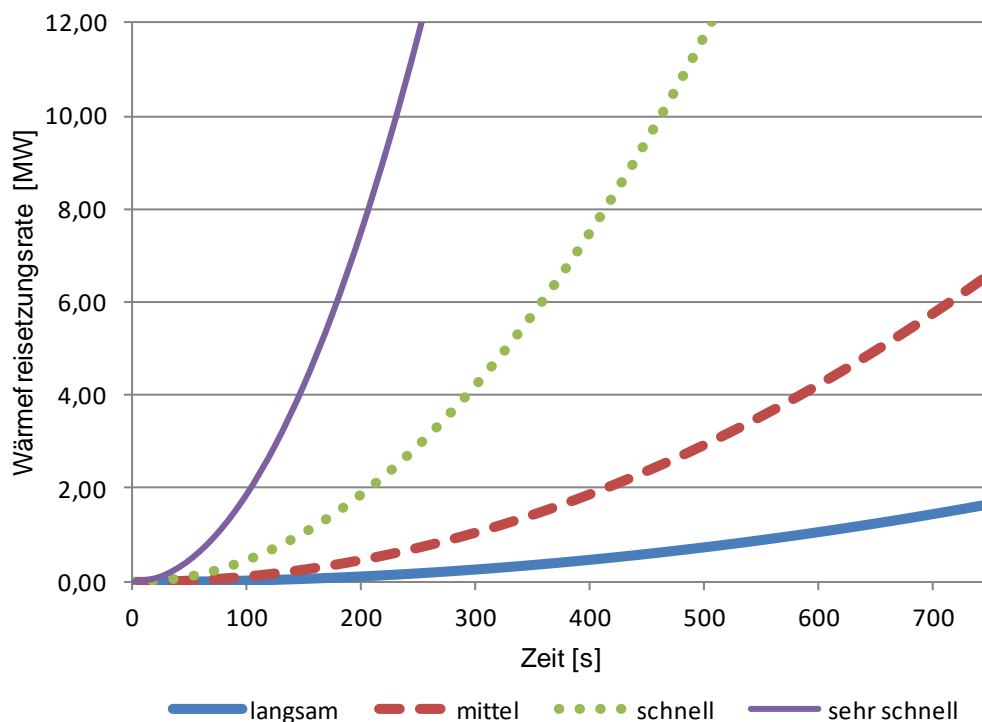


Bild 4.2 Brandentwicklung bis zum Erreichen einer maximalen Wärmefreisetzungsrate

Der Tabellen-Anhang ¹ enthält Empfehlungen für die Einstufung verschiedener Nutzungen und Werte für bestimmte brennbare Materialien.

¹ Die Tabellenwerte sind als Richtwerte zu verstehen und nicht als normative Vorgaben.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Aus den Versuchen im Originalmaßstab zur Einstufung von Nutzungseinheiten ergaben sich Maximalwerte für die Brandleistung vor einem unterschiedlichen Abklingen des Brandes. Die Formel gibt den Brandverlauf also nur bis zum Erreichen dieses Maximalwertes in brauchbarer Annäherung wieder.

Bei den Berechnungen der Wärmefreisetzungsrate nach der t^2 -Beziehung oder über die flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate geht der Abbrand der brennbaren Stoffe nicht direkt in die Berechnungen ein. Deswegen müssen zusätzlich Zahlenwerte zu den Rauchpotenzialen und zum Sauerstoffbedarf der brennbaren Stoffe als Eingabegrößen für die Brandsimulationsmodelle bereitgestellt werden zur Feststellung des aktuellen Brandregimes oder wenn der Rauchschutz Zielgröße der Berechnung ist (vergl. Kapitel 8).

Tabelle 4.2 Zuordnung der Brandentwicklung zu unterschiedlichen Nutzungsarten und Stoffgruppen

Brandentwicklung	Nutzungsart [4.9]	Stoffgruppen [4.10][4.11]
langsam	Gemäldegalerie	dicht gepackte Holzwaren
mittel	Wohnung, Büro, Hotel (Rezeption, Zimmer), jegliche Nutzung ohne leichtbrennbare Stoffe [4.7]	Baumwolle / Polyester Federkernmatt ratze, massive Holzmöbel (z. B. Schreibtisch), einzelne Möbelstücke mit geringer Menge an Kunststoffen
schnell	Laden	(hoch) gestapelte Holzpaletten, gefüllte Postsäcke, Kartone auf Paletten, einige Polstermöbel, Kunststoffschäum
sehr schnell	Industrielager, Fertigungshalle	(schnellbrennende) Polstermöbel, hoch gestapelte Kunststoffe, dünne Holzmöbel (z. B. Kleiderschrank), leichte Gardinen, Pool-Feuer

Tabelle 4.3 Standardwerte für α (Drysdale [4.13]) und t_α (NFPA 92 B [4.14])

Brandentwicklung	Parameter α [kW/s ²]	t_α [s] Branddauer bis zum Erreichen von $\dot{Q} = 1 \text{ MW}$ *)
langsam	0,002931	600
mittel	0,011720	300
schnell	0,046890	150
sehr schnell	0,187600	75

*) Die Werte für die Brandentwicklungsfaktoren α wurden für eine Wärmefreisetzungsrate von 1000 BTU/s ermittelt und normiert. Dabei gilt folgende Umrechnung:
1 BTU (British Thermal Unit) \approx 1055,056 J; 1 BTU/s \approx 1055,056 W.

4.3.2.2 Geometrisches Ausbreitungsmodell für die Brandentwicklungsphase

Das zuvor beschriebene t^2 - Modell geht von einer kreisförmigen Brandausbreitung mit der Zündstelle in der Mitte des Raumes aus. Mit dem geometrischen Ausbreitungsmodell kann die reale Brandentwicklung abgebildet werden für den Fall, dass sich die Zündstelle ausgehend von dem gewählten Szenario nicht in der Raummitte sondern an anderer Stelle befindet. Darüber hinaus kann unter Berücksichtigung einer geometrischen Ausbreitung bei der Modellierung der Brandfläche in Simulationsmodellen, eine realistischere Darstellung des Brandverlaufs erfolgen, da hierbei lokale Brandwirkungen besser berücksichtigt werden.

Mit dem geometrischen Ausbreitungsmodell wird in einem ersten Schritt die Entwicklung der Brandfläche in Abhängigkeit von der Zeit und anschließend die Brandverlaufskurve unter Verwendung der flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrate bestimmt.

Die so bestimmte Brandfläche bzw. Brandverlaufskurve wird durch die geometrischen Randbedingungen des Brandraumes und der Brandlasten sowie ggf. auch durch betriebliche und anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen begrenzt.

Orientierungswerte für die Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} können dem Anhang entnommen werden. Weitere Angaben zur Brandausbreitungsgeschwindigkeit finden sich u. a. in [4.13], [4.24] und [4.26].

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} besteht in der Umrechnung des t^2 -Modells in das geometrische Modell:

$$v_{\text{aus}} = r/t = \frac{\sqrt{Q_0}}{t_{\alpha} \sqrt{\pi \cdot \text{RHR}_f}} \quad (4.3)$$

mit

v_{aus}	konstante Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min,
r	radiale Brandausbreitung [m]
RHR_f	flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate [MW/m ²]
t	Zeit in min,

Im geometrischen Brandmodell kann der lokale Ausbrand in der Art eines vereinfachten „traveling fires“ berücksichtigt werden. Dabei wird von einer Brandausbreitung in der Fläche ausgegangen, die Brandfläche gedanklich in Teilflächen zerlegt. Über die flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate und den Heizwert der Brandlasten kann berechnet werden wann die Brandlast in der entsprechenden Teilfläche aufgezehrt ist.

4.3.2.3 Beschreibung der Vollbrandphase

Bemessungsbrände für die Beschreibung der Vollbrandphase werden vorwiegend für die Auslegung der Konstruktionsbauteile von Gebäuden benötigt, die auch dann noch ihre Standsicherheit bewahren müssen, wenn Löschmaßnahmen erfolglos bleiben. Bei der Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate ist das Brandregime zu berücksichtigen.

Es lassen sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Brandregime unterscheiden:

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

- Durch Begrenzung aktivierbarer Brandlasten wird, selbst wenn alle brennbaren Stoffe in das Brandgeschehen eingebunden sind, die Brandleistung limitiert (brandlastgesteuerter Brand).
- Durch Mangel an Verbrennungsluft wird, selbst wenn alle brennbaren Stoffe in das Brandgeschehen eingebunden sind, die Gesamt-Brandleistung in Abhängigkeit von der verfügbaren Luftzufuhr begrenzt (ventilationsgesteuerter Brand).

Die maximale Wärmefreisetzungsrate kann als der kleinere der beiden Maximalwerte des ventilationsgesteuerten bzw. brandlastgesteuerten Brandes bestimmt werden [4.15], da durch das dominierende Brandregime die maximale Einwirkung im Brandraum bestimmt wird:

$$\dot{Q}_{\max} = \text{MIN} \left\{ \dot{Q}_{\max,v} ; \dot{Q}_{\max,f} \right\} \quad \text{in kW} \quad (4.4)$$

Mit Hilfe von Gleichung (4.4) lässt sich somit feststellen, ob der Brand ventilations- oder brandlastgesteuert ist.

Bild 4.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der umgesetzten Brandlast für einen brandlastgesteuerten und einen ventilationsgesteuerten Brand bei verschiedenen Ventilations- und sonst gleichen Bedingungen.

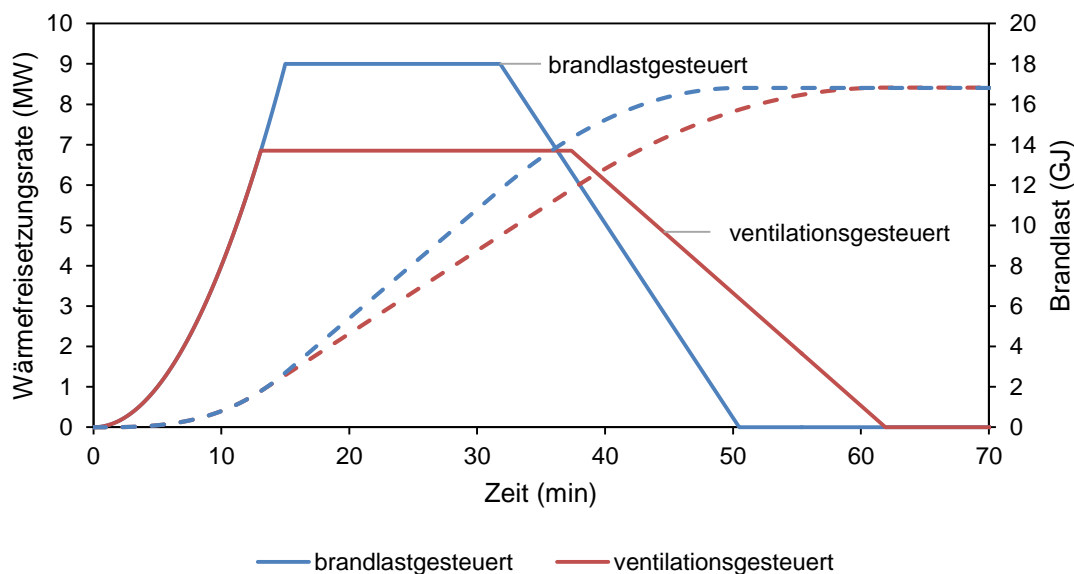


Bild 4.3 Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Wärmefreisetzungsrate und der umgesetzten Brandlast für einen brandlastgesteuerten und einen ventilationsgesteuerten Brand bei verschiedenen Ventilations- und sonst gleichen Bedingungen

Für die Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Wärmefreisetzungsrate werden im Folgenden die bereits eingeführten Brandregime unterschieden.

Brandlastgesteuerter Brand

Bei einem brandlastgesteuerten Brand ist die Wärmefreisetzung durch die brennende Oberfläche der Brandlasten begrenzt. Die Wärmefreisetzungsrate ergibt sich nach [4.21] zu

$$\dot{Q}(t) = \dot{m}'' \cdot A_F(t) \cdot \chi \cdot H_i \quad \text{in MW} \quad (4.5)$$

mit

\dot{m}'' flächenspezifische Abbrandrate in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$,

$A_F(t)$ Brandfläche (mit Branddauer zunehmend) in m^2 ,

t Zeit in h,

χ Verbrennungseffektivität [-],

H_i Heizwert der brennbaren Stoffe in MJ/kg .

Gemäß DIN EN 1991-1-2 [4.22] wird vereinfachend für feststoffartige Brandlasten $\chi = 0,8$ angegeben, für flüssigen Brandlasten $\chi = 0,9$ und für gasförmigen Brandlasten $\chi = 1,0$.

In [4.21] wird zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates in Büro- und Wohnräumen der Zusammenhang vorgeschlagen:

$$\dot{Q}_{\max,f} = 0,25 \cdot A_{\text{Brand}} \quad \text{in MW} \quad (4.6)$$

Diese Gleichung wurde an Hand von Realbrandversuchen überprüft. Sie kann auf Brandflächen von bis zu 400 m^2 angewendet werden.

Ventilationsgesteuerter Brand

Der ventilationsgesteuerte Brand ist eine Art des Abbrandes, bei der in dem jeweiligen Raum gemessen an den vorhandenen Brandstoffen nicht ausreichend Verbrennungsluft zur Verfügung steht. Die Verbrennung im Raum wird somit durch die über die Öffnungen ein- und ausströmenden Gasanteile limitiert.

Während im brandlastgesteuerten Fall die Abbrandrate der limitierende Faktor der Wärmefreisetzung ist, ist dies im ventilationsgesteuerten Fall der Luft- bzw. Sauerstoffzustrom. Analog zur Verbrennungseffektivität χ im brandlastgesteuerten Fall wird im ventilationsgesteuerten Fall der Sauerstoffbedarf und der Grad der Sauerstoffausnutzung χ_{O_2} mitbetrachtet.

Vereinfacht lässt sich die maximale Wärmefreisetzungsrates $\dot{Q}_{\max,v}$ bei einem ventilationsgesteuerten Raumbrand als Produkt des Sauerstoffmassenstroms \dot{m}_{O_2} bzw. des Zuluftmassenstroms \dot{m}_L und der jeweiligen Wärmefreisetzung je umgesetzter Masse Sauerstoff E_{O_2} bzw. Frischluft E_L wie folgt beschreiben [4.13],[4.16]:

$$\dot{Q}_{\max,v} = \dot{m}_{\text{O}_2} \cdot E_{\text{O}_2} \cdot \chi_{\text{O}_2} = \dot{m}_L \cdot E_L \cdot \chi_{\text{O}_2} \quad \text{in MW} \quad (4.7)$$

Bei der Verbrennung organischer Brandlasten findet eine nahezu konstante Wärmefreisetzung pro Masseneinheit verbrauchtem Sauerstoff statt. Für diese Wärmefreisetzung wurde ein mittlerer Wert von $E_{\text{O}_2} = 13,1 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{O}_2}$ bzw. $E_L = 0,231 \cdot E_{\text{O}_2} = 3,03 \text{ MJ}/\text{kg}_L$ ermittelt [4.18].

Der vorgenannte auf den Luftverbrauch bezogene Wert E_L kann auch durch den brandlastbezogenen Heizwert H_i in Verbindung mit dem stöchiometrischen Luftbedarf r ersetzt werden:

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

$$\dot{Q}_{\max,v} = \dot{m}_L \cdot \chi_{O_2} \cdot \frac{H_i}{r} \quad \text{in MW} \quad (4.8)$$

mit

- \dot{m}_L Zuluftmassenstrom in kg/s
- H_i Heizwert der brennbaren Stoffe in MJ/kg_{Brandlast}
- χ_{O_2} Sauerstoffausnutzungsgrad [-]
- r stöchiometrischer Luftbedarf in [kg_{Luft} / kg_{Brennstoff}]

Zwischen dem Heizwert organischer Brandlasten und dem stöchiometrischen Luftbedarf besteht ein mathematischer Zusammenhang. In Auswertung der in [4.6] dokumentierten Werte für verschiedene repräsentative Brandlasten, ist dieser Zusammenhang linear und beträgt:

$$r \approx 0,33 \cdot H_i = \frac{1}{E_L} \cdot H_i \quad \text{in kg}_{Luft}/\text{kg}_{Brennstoff} \quad (4.9)$$

Dieser Zusammenhang (siehe Bild 4.4) gilt sowohl für die vollständige als auch für die unvollständige Verbrennung [4.17].

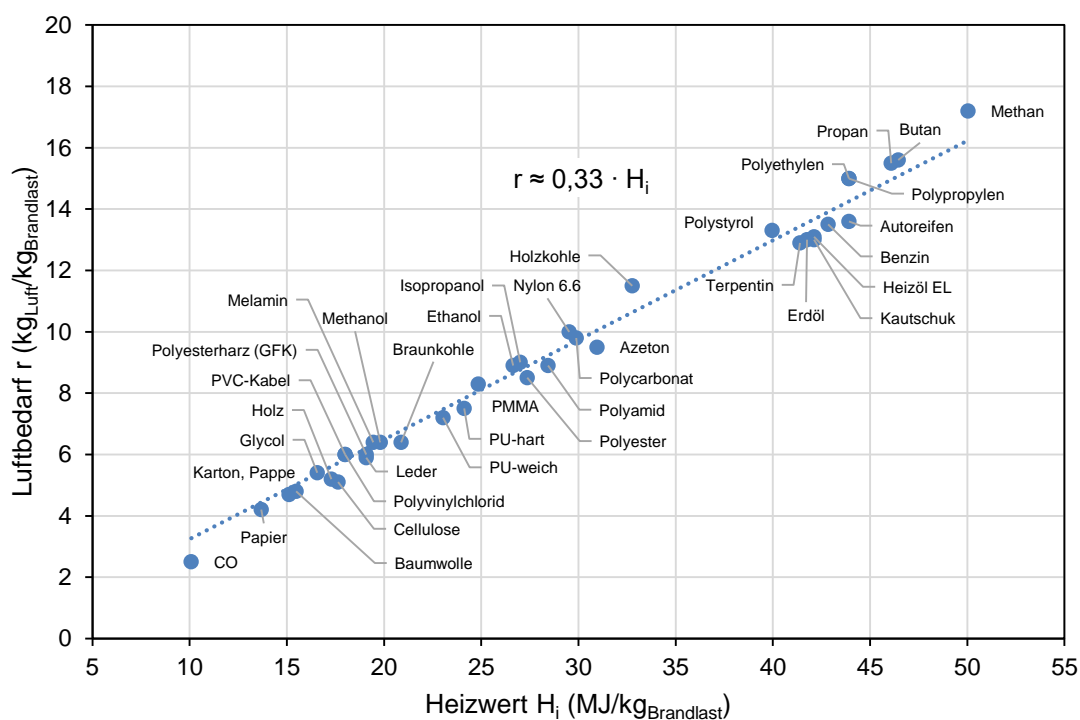


Bild 4.4 Zusammenhang zwischen Luftbedarf und Heizwert, zusammengestellt nach [4.6]

Der für die Ableitung der maximalen Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{\max,v}$ notwendige Zuluftmassenstrom \dot{m}_L kann bei Bränden in Räumen mit ausschließlich

- a) mechanischer Lüftung aus dem Zuluftmassenstrom der Zwangsbelüftung abgeschätzt werden.

- b) natürlichen vertikalen Öffnungen in Wänden über die Kawagoe-Gleichung (4.10) abgeschätzt werden [4.21]. Die Fläche der Ventilationsöffnungen und die lichte Höhe der Öffnungen eines Raumes begrenzen hierbei den Zuluftmassenstrom.

Der Zuluftmassenstrom \dot{m}_L berechnet sich nach [4.23] zu

$$\dot{m}_L = 0,52 \cdot A_W \cdot \sqrt{h_W} \quad \text{in kg/s} \quad (4.10)$$

Durch Einsetzen von (4.9) und (4.10) in (4.8) lässt sich allgemein schreiben:

$$\dot{Q}_{\max,v} = 1,57 \cdot \chi_{O_2} \cdot A_W \cdot \sqrt{h_W} \quad \text{in MW} \quad (4.11)$$

In [4.19] wurde bei Raumbränden in der Vollbrandphase eine vertikale Temperaturverteilung im Bereich der Zuluftflächen zwischen 900°C und 1.000°C gemessen. Auch bei diesen Temperaturen wird nicht der gesamte Sauerstoff durch die Verbrennung aufgebraucht. Der Sauerstoffindex gibt jenen Sauerstoff-Volumenanteil an, bei dem ein Verlöschen auftritt. Dieser Sauerstoffindex ist abhängig vom Brennstoff und der Temperatur (Bild 4.5).

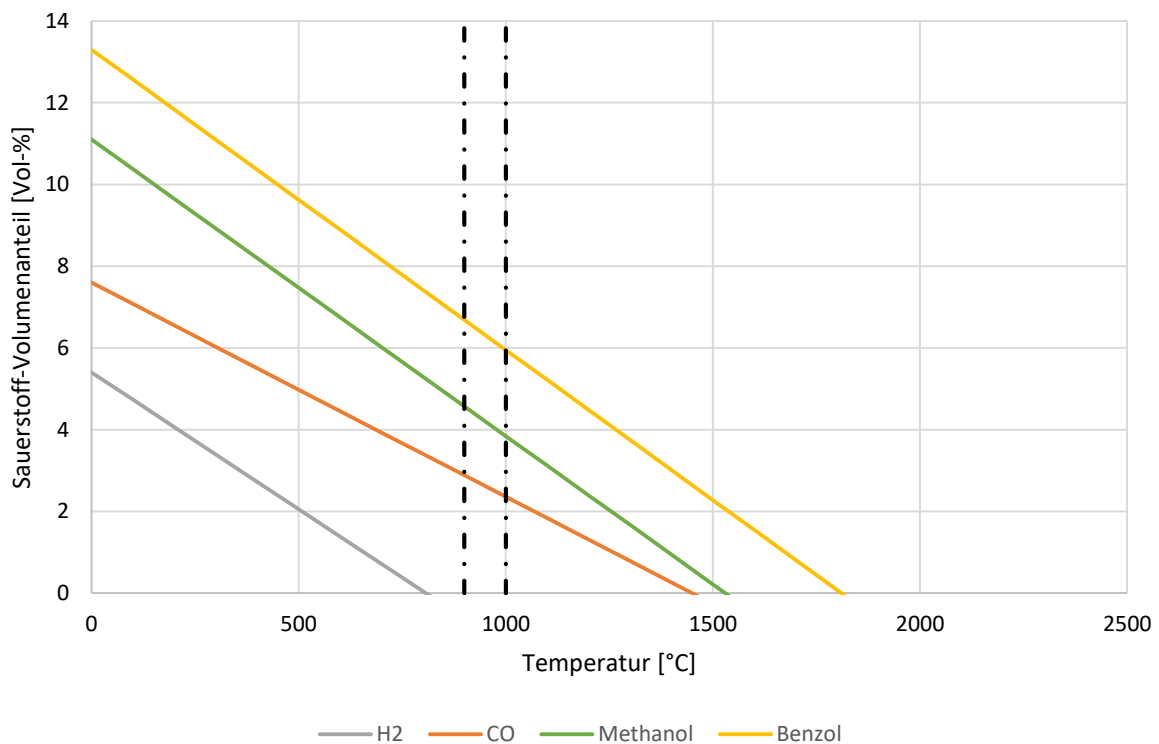


Bild 4.5 Aufrechterhaltung der Verbrennung in Abhängigkeit der Temperatur und des Sauerstoff-Volumenanteils nach [4.20]

Unterhalb der in Bild 4.5 dargestellten Grenzkurven findet keine Verbrennung statt. Für den in der Vollbrandphase auftretenden Temperaturbereich zwischen 900°C und 1.000°C liegt der Sauerstoffanteil zwischen 2,35 Vol.-% und 6,89 Vol.-%. Bezogen auf einen Sauerstoffanteil von 21 Vol.-% im Zuluftmassenstrom ergibt sich für diese Brennstoffe ein maximaler Sauerstoffausnutzungsgrad zwischen 0,68 und 0,89.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Wird ein Sauerstoffausnutzungsgrad von 0,8 angenommen, ergibt sich der Zusammenhang

$$\dot{Q}_{\max,v} = 1,26 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{in MW} \quad (4.12)$$

für Gleichung (4.11). Der Vorfaktor in Gleichung (4.12) liegt in dieser Größenordnung zwischen dem Faktor 1,21 nach [4.22] Gleichung (AA.1) und 1,38 nach [4.22] Gleichung (BB.6). In [4.22] werden diese Ansätze für Räume bis 400 m² angenommen, für größere Räume liegen die Annahmen für die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate auf der sicheren Seite.

Bei mehreren vertikalen Öffnungen i ermittelt sich die Höhe der Öffnungsflächen h_w aus dem Verhältnis der Summe der Höhe der Öffnungen $h_{w,i}$ multipliziert mit den bezogenen Öffnungsflächen $A_{w,i}$ zu der gesamten vorhandenen Öffnungsfläche $A_{w,ges}$

$$h_w = \sum \frac{h_{w,i} \cdot A_{w,i}}{A_{w,ges}} \quad \text{in m} \quad (4.13)$$

Der empirische Ansatz zum Zuluftmassenstrom (Gleichung (4.10)) lässt sich auch aus der Bernoulli-Gleichung für stationäre Strömungen herleiten [4.13] und beinhaltet grundlegende Vereinfachungen (u. a. konstante Brandraumtemperatur), welche die Branddynamik innerhalb des Brandraumes vernachlässigen, um eine analytische Lösung abzuleiten.

Im Rahmen der Verwendung von Brandsimulationsprogrammen ist es angeraten die Ventilationsverhältnisse als zeitabhängige Berechnungsgrößen / Randbedingungen der Modellberechnung zu Grunde zu legen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sich die Ventilationsverhältnisse zeitabhängig ändern, da z. B. Fenster geöffnet werden, um Entrauchungsmaßnahmen zu steuern. Hierfür sollte der höhere Wert der Wärmefreisetzungsrate nach Gleichung (4.4) eingesetzt werden, der bei Brandbeginn vorliegt. In diesem Fall wird der brandlastgesteuerte Fall für die Vorgabe des Verlaufs der Wärmefreisetzungsrate verwendet und durch Sauerstoffkontrolle des Verbrennungsmodells die tatsächliche Wärmefreisetzungsrate innerhalb des Modells bestimmt. Hierdurch werden die Brandverläufe berücksichtigt, die für die Heißbemessung konservativ sind.

4.3.3 Normativ geregelte Bemessungsbrände

4.3.3.1 Allgemeines

In den nächsten Unterkapiteln werden verschiedene normativ festgelegte Bemessungsbrände aufgeführt. Für einige dieser Bemessungsbrände - die durch die Vorgabe von mittleren Brandraumtemperatur/Zeit-Kurven definiert sind - sind die Temperaturentwicklungen in Bild 4.4 grafisch dargestellt.

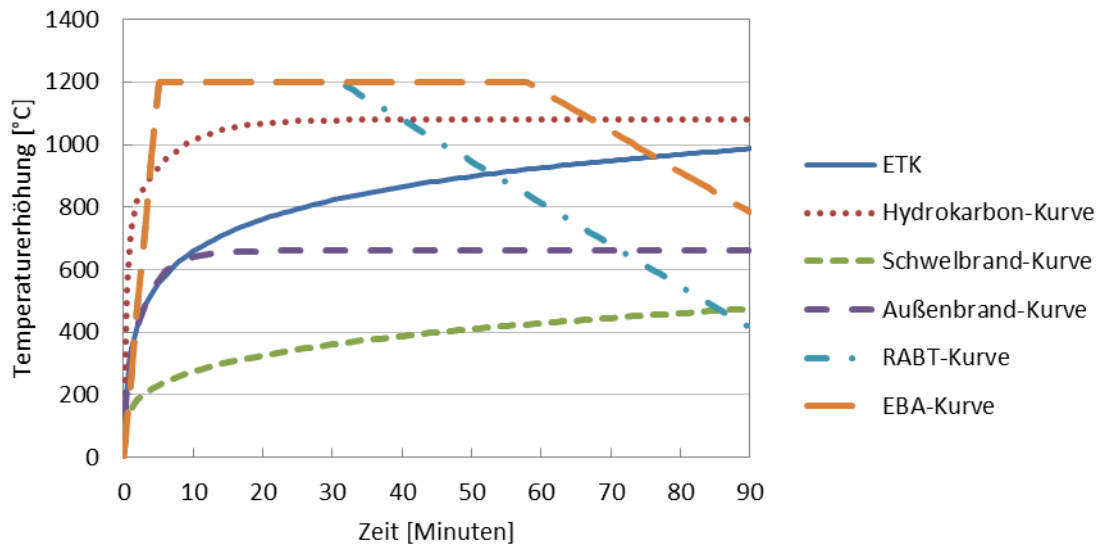


Bild 4.6 Normative Bemessungsbrandkurven im Vergleich; Darstellung der Temperaturerhöhung im Brandraum

Für die Gleichungen (4.14) bis (4.17) werden die folgenden Symbole verwendet.

T	Brandraumtemperatur [K]
T ₀	Temperatur der Probekörper bei Versuchsbeginn [K]
t	Zeit in Minuten

4.3.3.2 Bemessungsbrände nach der Schwelbrandkurve

Die sogenannte Schwelbrandkurve wird für die Brandausbreitungsphase bei einem Naturbrand mit geringem Anstieg der Wärmefreisetzungsrate herangezogen. Die Entwicklung der Brandraumtemperatur ist über folgende Formel definiert:

$$T - T_0 = 154 \cdot (t)^{0,25} \quad \text{in K} \quad (4.14)$$

4.3.3.3 Bemessungsbrände für die Vollbrandphase

Normativ festgelegte Bemessungsbrände werden benötigt, um insbesondere Maßnahmen des anlagentechnischen Brandschutzes sowie Bauteile zu dimensionieren, ohne mit den Methoden des Brandschutzingenieurwesens besondere objektspezifische Brandszenarien bewerten zu müssen. Die anlagentechnischen Maßnahmen müssen ihre Wirkung in der Phase der Brandentwicklung (insbesondere Branderkennungselemente) und Brandausbreitung (insbesondere zur Brandbekämpfung) entfalten, also bevor die Vollbrandphase eingetreten ist.

Einheits-Temperaturzeitkurve

Die Einheits-Temperaturzeitkurve – ETK – nach DIN 4102-2 (bzw. DIN EN 1991-1-2 oder ISO 834) wird unmittelbar als Brandraum-Temperaturkurve zur Bauteilbemessung verwendet.

Sie ist über folgende Formel definiert:

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

$$T - T_0 = 345 \cdot \lg(8 \cdot t + 1) \quad \text{in K} \quad (4.15)$$

Außenbrand-Kurve

Entsprechend DIN EN 1991-1-2 kann für die Bemessung von außerhalb des Brandabschnittes liegenden Bauteilen innerhalb der jeweiligen nationalen Anwendungsbereiche die externe Brandkurve angewandt werden.

Die Entwicklung der Brandraumtemperatur ist über folgende Formel definiert:

$$T - T_0 = 660 \cdot \left(1 - 0,687 \cdot e^{(-0,32 \cdot t)} - 0,313 \cdot e^{(-3,8 \cdot t)} \right) \quad \text{in K} \quad (4.16)$$

Hydro-Karbonkurve

Brände von Kohlenwasserstoffen können deutlich höhere Temperaturen in kürzerer Zeit in einer Vollbrandsituation erreichen als die ETK angibt. In solchen Fällen kann die harmonisierte Hydro-Karbonkurve verwendet werden. Die Entwicklung der Erhöhung der Brandraumtemperatur ist in DIN EN 1991-1-2 über folgende Formel definiert:

$$T - T_0 = 1080 \cdot \left[1 - 0,325 \cdot e^{(-0,167 \cdot t)} - 0,675 \cdot e^{(-2,5 \cdot t)} \right] \quad \text{in K} \quad (4.17)$$

RABT-Kurve (Tunnelbrandkurve)

Die RABT-Kurve wird für die Auslegung von Bauteilen in Tunneln herangezogen. Hierbei wird ein Temperaturanstieg in der Brandkammer auf 1200 °C innerhalb 5 Minuten unterstellt.

Der Beginn des linearen Abfalls der Kurve erfolgt nach 30 Minuten (Bild 4.4).

4.3.3.4 Vereinfachtes Naturbrandmodell für die Bauteilbemessung

Der Abbrand verläuft nach Brandphasen und kann grob in die Brandentwicklungs- oder -ausbreitungsphase (bis t_1), die Vollbrandphase (t_1 bis t_2) und die Abklingphase (t_2 bis t_3) unterteilt werden. Für rechnerische Brandsimulationen als Grundlage für die Bauteilbemessung wird in der Regel ein schematisierter Verlauf der Wärmefreisetzungsrate gemäß Bild 4.5 zu Grunde gelegt. Dabei bedeuten:

\dot{Q}_s Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt t_0 , an dem der Entstehungsbrand in einen sich ausbreitenden Brand übergeht (Beginn Bemessungsbrand, siehe Bild 4.1),

$\dot{Q}_0 = 1000 \text{ kW}$,

t_g charakteristische Brandentwicklungszeit in s; der Zahlenwert entspricht der Branddauer bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzungsrate von 1 MW.

$\dot{Q}_{\max,v}$ maximale Wärmefreisetzungsrate des ventilationsgesteuerten Brandes,

$\dot{Q}_{\max,f}$ maximale Wärmefreisetzungsrate des brandlastgesteuerten Brandes,

Q_1 - Q_3 Energie der Brandlast, die in den einzelnen Brandphasen umgesetzt wird.

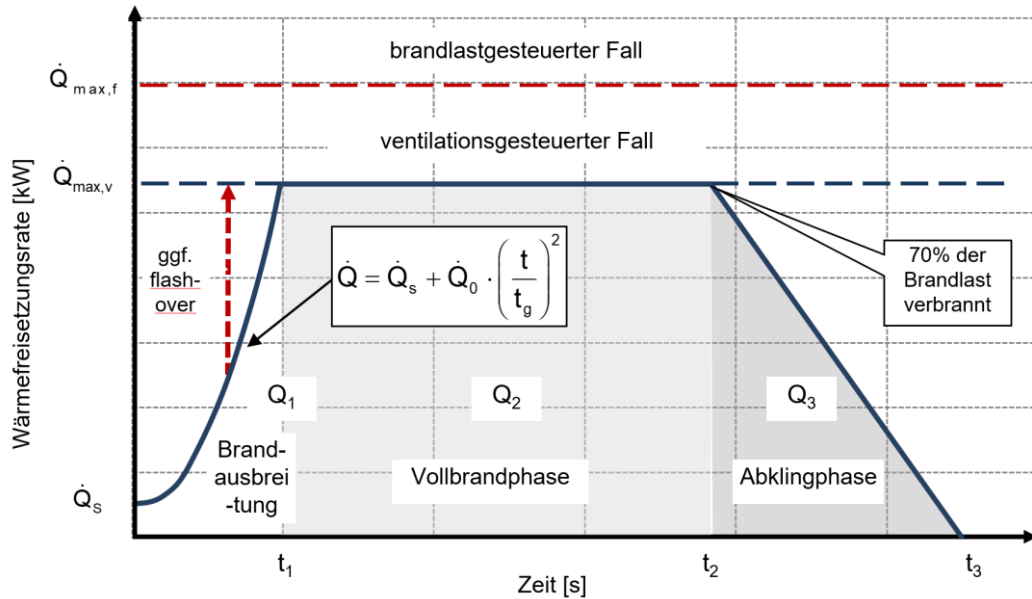


Bild 4.7 Schematisierter Brandverlauf für einen "natürlichen Brand" mit den Brandphasen: Brandausbreitung, Vollbrand und abklingender Brand

Mit dem vereinfachten Naturbrandmodell für die Vollbrandphase nach [4.21] kann für Räume bis zu 400 m² mit einer Höhe bis 5 m, vertikalen Öffnungsflächen von 12,5 % bis 50 % der Raumgrundfläche sowie Brandlastdichten von 100 MJ/m² bis 1300 MJ/m² der Temperaturzeitverlauf berechnet werden. Für größere und/oder höhere Räume liegen die ermittelten Temperaturen zunehmend auf der sicheren Seite.

Die maximale Wärmefreisetzungsrate für ventilations- bzw. brandlastgesteuerte Brände beliebiger Nutzung kann nach Kapitel 4.3.2.4 bestimmt werden.

In Bild 4.6 ist die standardisierte Brandverlaufskurve gemäß [4.21] mit den charakteristischen Zeitpunkten und den zugeordneten Temperaturen im Brandraum dargestellt. Wichtig ist, dass die Wärmefreisetzung und die Brandraumtemperatur charakteristische Ereignisse zu gleichen Zeitpunkten aufweisen.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

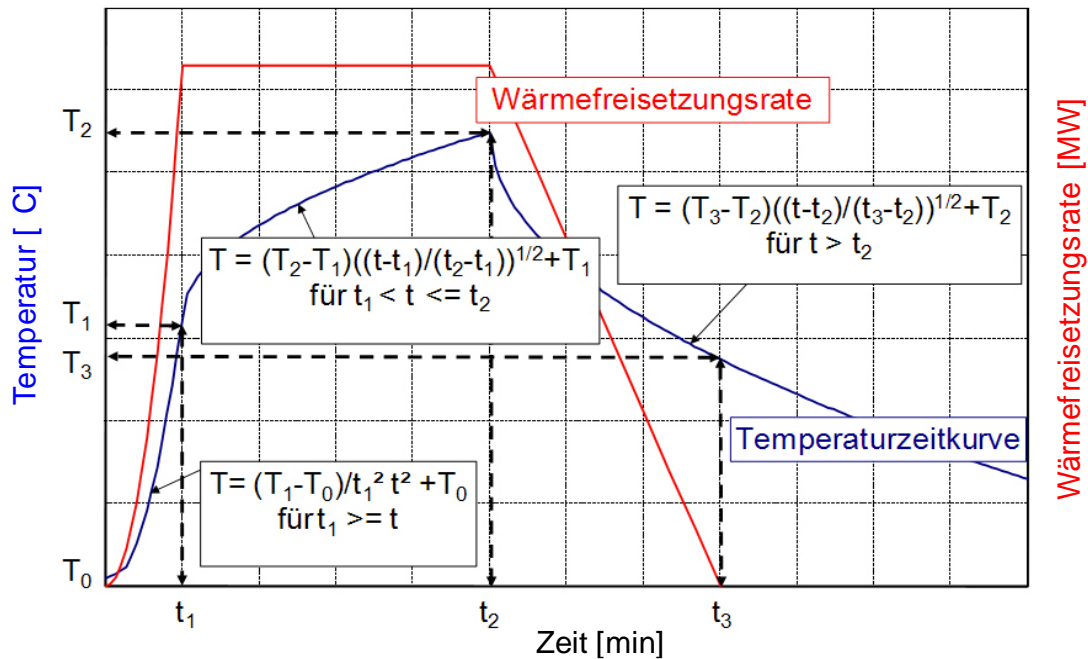


Bild 4.8 Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Temperaturzeitkurve gemäß dem vereinfachten Naturbrandmodell nach [4.21]

Der Zeitpunkt eines ggf. auftretenden Flashover $t_{1,fo}$, bei dem die Wärmefreisetzungsrate schlagartig auf ihr Maximum ansteigt, kann mit Gleichung (4.19) ermittelt werden:

$$t_{1,fo} = \sqrt{t_g^2 \cdot \dot{Q}_{fo}} \quad \text{in s} \quad (4.18)$$

wobei \dot{Q}_{fo} in [MW] nach der Methode von Thomas [4.24] bestimmt werden kann (siehe Kapitel 4.3.4).

Abklingphase

Die Abklingphase eines „ungestörten“ Brandes beginnt in der Regel nachdem ca. 70 % der insgesamt auf der Brandfläche freisetzbaren Energie umgesetzt worden sind. Dann fällt die Wärmefreisetzungsrate ab bis die Brandlast aufgezehrt ist. Der Abfall kann vereinfacht linear angesetzt werden.

4.3.4 Flashover

Der Brandverlauf kann plötzlich von der Brandausbreitungsphase in die Vollbrandphase übergehen, wenn die sogenannten „Flashover-Kriterien“ erfüllt sind.

Der Flashover entsteht in einem Raum, wenn sich ein kleiner örtlich begrenzter Brand so ausbreitet, dass alle freiliegenden brennbaren Oberflächen in den Abbrand einbezogen werden. Die Ausbreitung erfolgt in einer verhältnismäßig sehr kurzen Zeit.

Über dem örtlich begrenzten Brand reichern sich unverbrannte Pyrolysegase an, die sich im deckennahen Bereich ausbreiten. Bei Überschreitung der zündfähigen Konzentration und der Zündtemperatur werden diese Gase in Abhängigkeit von dem Sauerstoffanteil im Heißgas

großflächig im Raum entzündet. Es entstehen mit Flammen durchsetzte Heißgase, deren Strahlungswirkung die unterhalb befindlichen brennbaren Oberflächen entzünden.

Der Flashover ist mit dem Eintritt folgender Parameter verbunden. Die wichtigsten Flashover-Kriterien sind

- Wärmefreisetzungsrate,
- die Flammenstrahlung und/oder die Wärmestrahlung aus der Heißgasschicht.

Es kann angenommen werden, dass ein Flashover in Räumen auftritt, wenn die Temperatur der Heißgasschicht Werte zwischen 450 °C und 600 °C überschreitet.

Nach THOMAS und WALTON [4.24] (auch im Nationalen Anhang zu DIN EN 1991-1-2 enthalten) entsteht ein Flashover bei Überschreitung einer bestimmten Wärmefreisetzungsrate:

$$\dot{Q}_{fo} = 7,8 \cdot A_T + 378 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{in kW} \quad (4.21)$$

mit

A_T Innenflächen des Raumes gesamt in m²

A_w Öffnungsfläche in m²

h_w gemittelte, lichte Höhe der Öffnungen in m

Diese Formel gilt nur für Brandräume ohne Öffnungen in der Dach- bzw. Deckenfläche und für Brandräume bis zu max. 400 m² Grundfläche.

Bild 4.7 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate unter Berücksichtigung eines schlagartigen Anstiegs der Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt des Flashovers. Als Resultat des Flashovers wird die Vollbrandphase eingeleitet, in welcher die maximale Wärmefreisetzungsrate erreicht wird.

Ein schlagartiger Anstieg der Wärmefreisetzungsrate, wie es z. B. auch DIN EN 1991-1-2/NA vorsieht, stellt eine konservative Annahme dar. Insbesondere bei großen Räumen ist von einem verzögerten Anstieg der Wärmefreisetzungsrate infolge des Flashovers auszugehen. Alternative Ansätze zur Ermittlung des verzögerten Anstiegs der Wärmefreisetzungsrate im Anschluss an den Flashover sind in [4.25] enthalten.

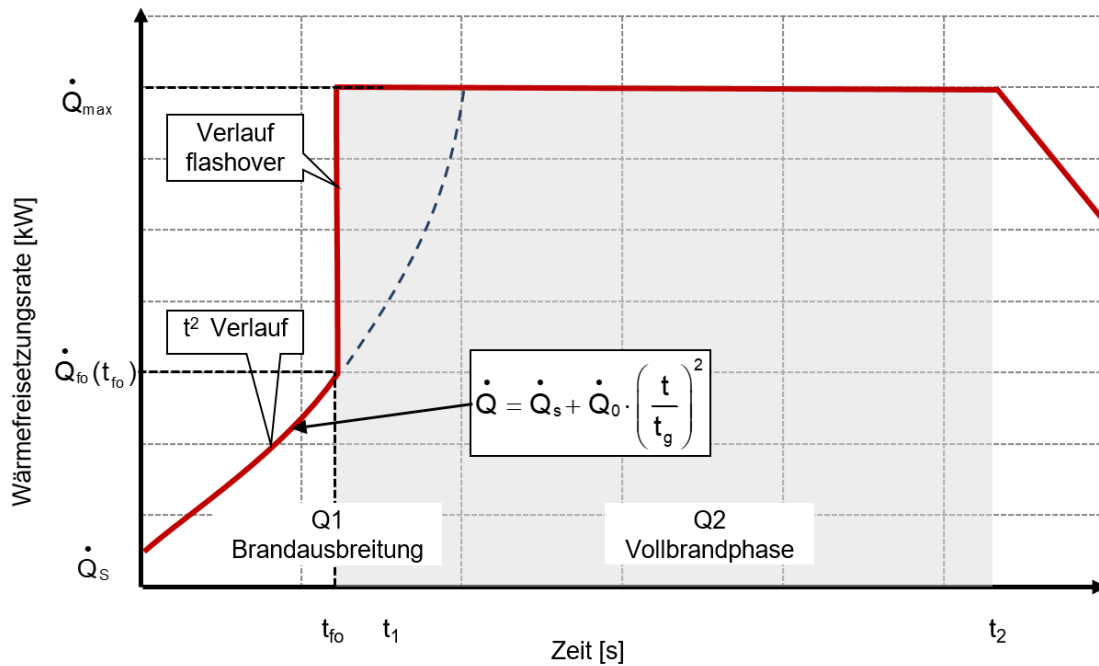


Bild 4.9 Schematisierter Brandverlauf für einen "natürlichen Brand" unter Berücksichtigung eines Flashovers in der Brandphase Brandausbreitung

4.3.5 Objektspezifische Bemessungsbrände für kleine Brandobjekte

Sofern das Brandverhalten eines einzelnen Gegenstandes selber als Grundlage für die Beurteilung der Brandsicherheit in Gebäuden wichtig ist, sind geeignete experimentelle Untersuchungen erforderlich, bei denen reproduzierbar die wesentlichen Brandkenngrößen Wärmefreisetzungsrate und Rauchfreisetzung erfasst werden. Hierbei wird der zeitliche Verlauf des Brandgeschehens messtechnisch erfasst und kann den rechnerischen Untersuchungen zu Grunde gelegt werden (z. B. Sitzgruppe oder Empfangstresen in einer Eingangshalle). Diese Versuche können im Allgemeinen mit einer ungehinderten Luftzufuhr durchgeführt werden, unter der Voraussetzung, dass in der Realität der Luftbedarf für den Abbrand im Vergleich zur vorhandenen Raumgröße des Brandraumes gering ist.

Die Messwerte dieser „Einzeluntersuchungen“ können für besondere Untersuchungen auch miteinander so kombiniert werden, dass sie für die Brandphase der „Brandausbreitung“ einen möglichen Verlauf des sich fortentwickelnden Brandgeschehens in einem Raum wiedergeben (vgl. [4.26]). Anhaltswerte können der Fachliteratur entnommen werden. Einige Beispiele sind im Anhang zu diesem Kapitel 4 zusammengestellt.

4.3.6 Einfluss von Löschvorgängen auf den Brandverlauf

Der Einfluss von Löschvorgängen auf die Pyrolyserate, Verbrennungseffektivität und Entwicklung von Brandprodukten beschränkt sich in der Regel auf die Reduzierung der Abbrandrate. Die Auswirkung auf die Entstehung der Brandprodukte wird rechnerisch daraus ermittelt.

Der Einfluss von aktiven Brandschutzmaßnahmen auf die Brandentwicklung kann in vielen Fällen ebenfalls bereits im Vorwege abgeschätzt und den weiteren Untersuchungen vorgegeben werden. Beispielsweise kann davon ausgegangen werden, dass die Wärmefreisetzungsrate in

einem sprinklergeschützten Raum eingeschränkt wird. Je nach dem Auslösezeitpunkt und nach der abschätzbaren Effektivität der Löschmaßnahme können sich unterschiedliche Brandentwicklungen einstellen (Bild 4.8).

In der Regel darf die Löschwirkung der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr nicht im Rahmen von Brandschutzkonzepten einer Brandsimulation zugrunde gelegt werden, weil

- das Einhalten der anzunehmenden Hilfsfrist nicht garantiert werden kann,
- der Beginn der Löschmaßnahmen nach dem Eintreffen am Einsatzort durch andere Aufgaben der Feuerwehr (z. B. Menschenrettung, Sicherungsmaßnahmen) erheblich verzögert werden kann.

Falls im Einzelfall die Löschwirksamkeit der Feuerwehr angerechnet werden soll, müssen die Voraussetzungen vorab mit der zuständigen Stelle abgestimmt werden. Die Wirksamkeit kann dann mit dem in Kapitel 7.6.1.4 des Leitfadens vorgeschlagenen vereinfachten Löschmodell abgeschätzt werden. Dieses vergleicht die ungestörte Ausbreitung der Brandfläche A_F bis zum Beginn der Löschmaßnahmen (Aktivierungszeit t_{act}) mit der von der Feuerwehr (unter den vorliegenden Bedingungen) beherrschbaren Brandfläche $A_{L\ddot{o}sch,max}$.

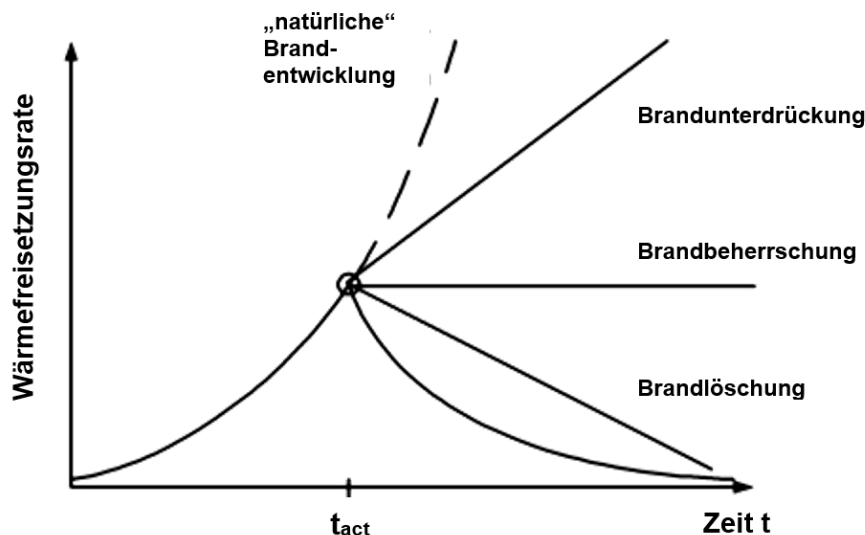


Bild 4.10 Modellcharakteristiken für den Einfluss von Löschmaßnahmen auf die Entwicklung eines Bemessungsbrandes

Für die Reduktion der Wärmefreisetzungsrate eines Brandherdes durch die Wirkung einer Sprinkleranlage mit einer bestimmten Wasserbeaufschlagung w nach Aktivierung der Sprinkler zum Zeitpunkt t_{act} kann ein in den USA entwickelter Ansatz [4.29], [4.31] verwendet werden, der ebenfalls in Kapitel 7 des Leitfadens beschrieben wird.

4.3.7 Darstellung der Bemessungsbrände in Programmcodes

Die vorgestellten Methoden zur Festlegung von Bemessungsbränden für unterschiedliche Brandszenarien bzw. Brandphasen haben zum Ziel, die Brandentwicklung in der Form einer stationären oder zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}(t)$ zu beschreiben.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Für einfache Brandmodelle oder Rechenverfahren, in denen der Brandherd stark vereinfachend als Punktquelle betrachtet wird, genügt die Vorgabe von $\dot{Q}(t)$ – typischerweise oft in der Form des normativen $\alpha \cdot t^2$ -Bemessungsbrandes. In vielen Modellierungsansätzen, insbesondere in der CFD-Simulation der Rauch- und Wärmeausbreitung, spielen jedoch u. a. die Ausdehnung sowie Form und Lage des Brandherdes wichtige Rollen. Außerdem werden Umfang, Fläche, Form (rund oder rechteckig) oder Lage (frei oder in einer Ecke) des Brandherdes oft in empirischen Ansätzen (z. B. Plumemodelle) als Parameter benutzt (siehe Kapitel 5 einschl. Kapitelanhang).

Ausdehnung und Form des Brandherdes sind in der Regel sich dynamisch verändernde Größen, die in der Realität meist durch Rückkopplungsmechanismen auch mehr oder weniger stark von der Entwicklung der Umgebungsbedingungen abhängen. Die Abhängigkeit der Wärmefreisetzungsrates eines Lachenbrandes von der Wärmestrahlung auf die Lachenoberfläche und damit von der Brandraumtemperatur ist ein Beispiel für einen starken Rückkopplungsmechanismus.

Setzt man in der Brandmodellierung Bemessungsbrände ein, werden diese Abhängigkeiten von externen Einflussgrößen normalerweise bereits bei der Auswahl des Bemessungsbrandes berücksichtigt, indem man z. B. die (flächenspezifische) Brandleistung ausreichend hoch wählt oder eine entsprechend schnelle Brandausbreitung berücksichtigt.

Es ist also meist nicht erforderlich, eine direkte Rückwirkung der Umgebungsbedingungen auf die Brandheftigkeit zu behandeln. Eine Ausnahme bildet der in vielen Modellen explizit durch Bilanzierung der Zu- und Abluftmassenströme oder durch Berechnung der lokalen Sauerstoffkonzentration berücksichtigte Übergang vom brandlastgesteuerten zum ventilationsgesteuerten Abbrand. Festgelegt werden müssen jedoch bei geometrischen Brandausbreitungsmodellen die zeitlich veränderlichen geometrischen Parameter des Brandes. Dies macht je nach Simulationsmodell unterschiedliche Eingabegrößen erforderlich.

Einen wichtigen Einfluss auf das Brandgeschehen hat die Lage des Brandherdes innerhalb der räumlichen Strukturen, dabei vor allem die relative Position zu Ventilationsöffnungen. Dieser Effekt lässt sich nur in dreidimensionalen Raumbrandmodellen (CFD-Simulationen oder geeignet konstruierte physikalische Modelle) im Detail berücksichtigen.

Weitere Erläuterungen zur Darstellung der Bemessungsbrände werden in Kapitel 5 im Zusammenhang mit den einzelnen mathematischen Modellen ausführlicher diskutiert.

4.4 Literatur

- [4.1] DIN 18009-1: 2016-09. Brandschutzingenieurwesen – Grundsätze und Regeln für die Anwendung. Berlin: Beuth Verlag, September 2016.
- [4.2] *ZEHFUSS, J.*: Festlegung von Bemessungs-Brandszenarien und Bemessungsbränden – geeignete Vorgehensweisen für ingenieurtechnische Verfahren. vfdb-Zeitschrift 3/2019, S.159-167.
- [4.3] DIN EN 1991-1-2:2010-12, Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke; Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [4.4] *BABRAUSKAS, V.*: Glass breakage in fire, Fire Science and Technology Inc., https://www.researchgate.net/publication/267852703_Glass_breakage_in_fires
- [4.5] *KUNKELMANN, J.*: Feuerwehreinsatzpraktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäude moderner Bauweise, Teil 2, Brandschutzforschung der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle Brandschutztechnik, Forschungsbericht 164, Februar 2013.
- [4.6] *SCHNEIDER, U.*: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz. 3. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 2004. ISBN 3-8041-4189-7
- [4.7] *BUKOWSKI, R. W.*: How to Evaluate Alternative Designs Based on Fire Modelling. NFPA Journal, March / April 1995, NFPA, Quincy MA (USA).
- [4.8] *KOTTHOFF, I.; WILK, E.; REDMER, T.; WAGNER, S.*: Originalbrandversuche zur Darstellung der Brandentwicklung in Räumen und zur Brandbelastung der Fassade, MFPA Leipzig / Brandschutz Consult Leipzig / Landeskriminalamt Sachsen, 1997 – 2011.
- [4.9] BSI DD 240:Part1:1997 Fire Safety Engineering in Buildings. Guide to the application of fire safety engineering principles und Part 2:1997 Fire Safety Engineering in Buildings. Commentary on the equations given in Part 1.
- [4.10] Fire Code Reform Centre Limited, Fire Engineering Guidelines, Sydney, New South Wales, Australia, 1997.
- [4.11] *BUCHANAN, A. H.* (Hrsg.): Fire Engineering Design Guide, Second Edition, Centre of Advanced Engineering, Christchurch, New Zealand, 2001.
- [4.12] Autorenkollegium, Brandschutz - Formeln und Tabellen, Staatsverlag der DDR, Berlin, 1979.
- [4.13] *DRYSDALE, D.*: An Introduction to Fire Dynamics. Third Edition, Wiley-Interscience, New York, 2011.
- [4.14] NFPA 92 B: Guide for Smoke Management. NFPA, Quincy, MA (USA), 2000.
- [4.15] *HOSSER, D.; ZEHFUSS, J.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum erforderlichen Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Stahlbauweise. Forschungsvorhaben S 503 im Auftrag der Stiftung Industrieforschung Köln. Abschlussbericht, Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 2002.

- [4.16] *FORELL, B.; PARK, J.; BIRN, T.*: Bedeutung der Sauerstoffausnutzung bei Vollbränden, Symposium Heißbemessung, 12.09.2017, Braunschweig, 2017.
- [4.17] *OSBURG, M.; WILK, E.; GERUSCHKAT, F. J.*: Differenzierung des Brandverlaufs bei Raumbränden, Eine experimentell gestützte Untersuchung zur Ventilationssteuerung des Brandverlaufs bei Raumbränden, Symposium Heißbemessung, 24.09.2019, Braunschweig, 2019.
- [4.18] *HUGGET, C.*: Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements, Fire and Materials, 1980, Bd. 4, S. 61-65.
- [4.19] *BABRAUSKAS, W.; WILLIAMSON, R.B.*: Post flashover compartment fires: basis of a theoretical model, Fire and Materials, 2, p.39-53, 1978.
- [4.20] *BEYLER, C.*: Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames in SFPE, fifth edition, 2016.
- [4.21] *ZEHFUSS, J.*: Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung. Dissertation Technische Universität Braunschweig, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2004.
- [4.22] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2/NA: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [4.23] *KAWAGOE, K.*: Fire Behaviour in rooms, Report Nr. 27, Tokyo: Building Research Institute, 1958.
- [4.24] *WALTON, W. D.; THOMAS, P. H.*: Estimating Temperatures in Compartment Fires. In: DiNenno, P. J. et al. (Hrsg.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth Edition, Quincy, Massachusetts (USA), S. 3-204 – 3-221. 2008.
- [4.25] *WILK, E. ET AL.*: Der Brand in Räumen – Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit analytischen Rechenverfahren, ab vfdb-Zeitschrift 4/2012.
- [4.26] Internetzugang des NIST der U.S.A, <http://fire.nist.gov/fire/fires>.
- [4.27] VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), 10., überarbeitete Auflage, Springer, Berlin, 2006.
- [4.28] *BASCHKIRZEW, M. P.*: Aufgaben zur Wärmeübertragung, Staatsverlag der DDR, Berlin 1979.
- [4.29] *MADRZYKOWSKI, D.; VETTORI, R.*: A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System. NISTIR 4833, U.S. Department of Commerce, 1992, USA.
- [4.30] Draft British Standard Code of Practice for Application of Fire Safety Engineering Principles to Fire Safety in Buildings Document 94 / 340340 DC, 3 June 1994, BSI, London (GB).
- [4.31] *EVANS, D.*: Sprinkler Fire Suppression Algorithm for Hazard. NISTIR 5254, 1993, U.S. Department of Commerce, Technology Administration, USA.

- [4.32] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth Edition, Quincy, Massachusetts (USA), 2008.
- ALPERT, R. L.:* Ceiling Jet Flows.
- BABRAUSKAS, V.:* Heat Release Rates.
- FLEMING, R.:* Automatic Sprinkler System Calculations.
- PURSER, D. A.:* Toxicity Assessment of Combustion Products.
- [4.33] NFPA 92 B: Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas. NFPA, 1995, Quincy MA (USA).
- [4.34] *REICHEL, V.:* Brandschutzanforderungen an Baukonstruktionen, Staatsverlag der DDR – 1979.
- [4.35] NFPA 204 M: Guide for Smoke and Heat Venting. NFPA, 2007, Quincy, MA (USA).
- [4.36] *WALTON, W.; BUDNICK, E.:* Quick Response Sprinkler in Office Configurations: Fire Test Results. NBSIR 88-3695, U.S. Department of Commerce, 1988, USA.
- [4.37] *MADRZYKOWSKI, D.:* Office work station heat release study: Full scale vs. bench scale. Interflam '96 – Conference Proceedings. 7th International Fire Science and Engineering Conference, Interscience Communications, 1996, London (GB).
- [4.38] *LOUGHEED, G. D. ET AL.:* Full-Scale Fire Tests and the Development of Design Criteria for Sprinkler Protection of Mobile Shelving Units. Fire Technology, First Quarter 1994, NFPA, Quincy, MA (USA).
- [4.39] *WALTON, W. D.:* Quick Response Sprinklers in Chemical Laboratories: Fire Test Results. NISTIR 89-4200, U.S. Department of Commerce, 1989, USA.
- [4.40] *HÄGGLUND, B.; WICKSTRÖM, U.:* Smoke Control in Hospitals – A Numerical Study. Fire Safety Journal Vol. 16 No. 1, 1990, Elsevier Science, Barking, Essex (GB).
- [4.41] Brandrisikobewertung, Berechnungsverfahren, SIA 81, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 1984.
- [4.42] Beuth-Kommentare: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Kommentar zu DIN 18230. 3te Auflage, Beuth-Verlag, 2003.
- [4.43] *STEINERT, C.:* Feuerübersprung und Abbrandverhalten von Personenkraftwagen - Teil 1, Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V., 1998, Fraunhofer IRB Verlag, Heft T 2876, Stuttgart, 1999, ISBN 3-8167-5446-5. - Teil 2, Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V., 1999, Fraunhofer IRB Verlag, Heft T 2934, Stuttgart, 2000, ISBN 3-8167-5774-X.
- [4.44] *PREISS, H.; WILK, E.; WESKAMP, F.; BÖHME, K.:* Datenbank zur Erfassung von Brandkenndaten im Ergebnis von Branduntersuchungen und Experimenten sowie Angaben zu Stoffkennwerten. Feuerwehr Leipzig / Institut für Baustoffe - begonnen: 1987 (bürointernes Arbeitsmaterial - nicht veröffentlicht).
- [4.45] *SCHNEIDER, U.:* Grundlagen von Brandszenarien für den Brandschutzentwurf. vfdb-Zeitschrift 3 / 1995.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

- [4.46] *STEINBACH, K.; PLESS, G.*: Zum Brandverhalten zündfähiger Stoffe. Mitteilungen aus dem Institut der Feuerwehr vom 17.7.1989.
- [4.47] *SCHULZE, G.; SCHLIEMANN, H.*: Einsatz von Luftschaum bei der Bekämpfung von Bränden kritischer Brandmedien. Zeitschrift Unser Brandschutz – wiss.-tech. Beilage 7/1972.
- [4.48] *PLESS, G.; STEINBACH, K.*: Brandverhalten von Feststoffen. Institut der Feuerwehr Heyrothsberge – Mdl-Information 1/1982.
- [4.49] *KOTTHOFF, I.*: Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen an B1-Fassadenelementen und eines Verfahrens zur Berechnung von Brandverläufen an Fassaden, Forschungsbericht Nr. BI5-8001-96-18, MFPA Leipzig, 2000.
- [4.50] *ALBRECHT, C.*: A risk-informed and performance-based life safety concept in case of fire. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2012.
- [4.51] *KONG, D.; LU, S.; FRANTZICH, H.; LO, S. M.* 2013. A method for linking safety factor to the target probability of failure in fire safety engineering, Journal of Civil Engineering and Management 19 (Supplement 1): S. 212–S221.
<http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.802718>
- [4.52] *FORELL, B.*: Zur Notwendigkeit von Ausfallbetrachtungen bei ingenieurgemäßen Brandschutznachweisen. In: Tagungsband der 64. Jahresfachtagung der vfdb, Bremen, 21.-24.Mai 2017, 2017.

ANHANG ZU KAPITEL 4

A4.1 Vorbemerkung

Die Angaben in den Tabellen dieses Kapitelanhangs wurden ausgewählt, um dem Anwender Hinweise zu geben, mit welchen Größen bezogen auf die einzelnen Parameter, zu rechnen ist. Es wurden nur Angaben übernommen, die aus verlässlichen Quellen stammen und die für die praktische Anwendung geeignet sind.

Trotzdem muss der Anwender die Tabellenwerte stets kritisch in Bezug zu dem von ihm aufzusetzenden Quellterm bewerten und somit die Eignung des Tabellenwertes prüfen.

Je nachdem, welche Informationen zum konkreten nutzungsbezogenen Bemessungsbrand vorliegen, werden die oben genannten Stoffdaten einzeln oder in Kombination in die Erstellung des (Bemessungs-)Brandszenariums einbezogen. Stoffkennwerte können bedingt DIN 18230-3 [4.6] oder dem SFPE-Handbook [4.32] entnommen werden. Die Verwendung von Daten aus Literaturquellen (allgemein verfügbare Fachliteratur) bzw. von vereinfachten pauschalisierten Ansätzen sind möglich, soweit ihre Anwendbarkeit auf das konkret vorliegende Brandszenario belegt werden kann.

In diesem Anhang (Tabellenanhang ¹) sind Angaben zu Nutzungen, Gegenständen und Lagergütern ausgewählt worden, die im Rahmen der Erstellung von Brandschutzkonzepten häufig vorkommen. Bei der Auswahl dieser Daten wurden vor allem die Daten berücksichtigt, die den experimentellen Erfahrungen von Autoren dieses Kapitels entsprechen. Auf Zitate von Literaturdaten, die Extremwerte darstellen, wurde verzichtet ². Weiterführende Literaturhinweise schließen sich an. Bei der Benutzung von Literaturdaten ist zu beachten, dass stets die Randbedingungen mit dem konkreten Anwendungsfall zu vergleichen sind.

A4.2 Orientierungswerte für die Festlegung von Bemessungsbränden

Tabelle A4.1 Kennwerte für Nutzungen zur Abschätzung und Erarbeitung der Quellterme

Material bzw. Nutzung	Hinweise / Bedingungen	Brandbelastung [MJ/m ²]	Heizwert ³ [MJ/kg]	Brandentwicklung ⁴ t _a [s]	$\dot{q} = f(A)$ ⁵ [kW/m ²]	Quelle
Wohnraum		780 / 1085	19,5	300	250	[4.22]
					310	[4.8]
Büroraum	mit Großgerät oder Polstermöbeln	420 / 584	18,7	300	250	[4.22]
					270	[4.8]

¹ Die Tabellenwerte sind als Richtwerte zu verstehen und nicht als normative Vorgaben.

² z. B. kann der Abbrand eines leeren Kleiderschranks mit mehr als 6 MW/m² wohl als Exot gewertet werden, weil in der Realität kein leerer Kleiderschrank Gegenstand der Bewertung ist und man berücksichtigen muss, dass der Brand eines gesamten Wohnraumes vielleicht nur 5 MW erbringt.

³ bezogen auf in den meisten Fällen vorliegende Mischbrandlasten; dieser Begriff ist ganz allgemein als eine Mischung von Brandstoffen zu verstehen; der jeweiligen Nutzung zu

⁴ Steuergröße t_a nach DIN EN 1991-1-2, Anhang E.4, (t_a entspricht t_g)

⁵ alle Werte ohne Sprinklerschutz

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Material bzw. Nutzung	Hinweise / Bedingungen	Brandbelastung [MJ/m ²]	Heizwert ³ [MJ/kg]	Brandentwicklung ⁴ t _a [s]	$\dot{q} = f(A)$ ⁵ [kW/m ²]	Quelle
Bürraum	funktionsgebunden, ohne Polstermöbel	320 - 500	17,9	600	240	[4.8]
Krankenzimmer	2 Betten	230 / 320	18,6	300	250 160	[4.22] [4.8]
Hotelzimmer	2 Betten, Möbel Holzspantafeln	310 / 431 430 / ---	19,5 [4.8]	300 [4.30]	250 [4.33]	[4.22] [4.34]
Schule: Klassenraum	Möbel aus Holz, Sitze aus Formsperrholz	285 / 397	18,2	300	150	[4.22]
Hörsaal	Sitze aus Formsperrholz, Kleidung, Taschen	140 / ---	25,0	1.200	130	[4.8]
Eingangshalle	Empfangstresen, wenige Möbel mit geringer Polsterung	150 - 400	19,2	450	240	[4.8]
Einkaufszentrum		600 / 835		150	250 380	[4.22] [4.8]
Theater (Kino) / Zuschauersaal	gepolsterte Sitze	300 / 417		150 450	250 500	[4.22] [4.8]
Verkehr (öffentlicher Bereich)		100 / 139		600	250	[4.22]
Bücherei	mit Metallregalen	1.500 / 2.087	18,4	450 ¹	200 - 500	[4.24]

¹ Werte wurden korrigiert bzw. ergänzt, da die Angabe in der DIN EN 1991-1-2 nicht den Messungen aus Brandversuchen entspricht; vgl. [4.24]

Material bzw. Nutzung	Hinweise / Bedingungen	Brandbelastung [MJ/m ²]	Heizwert ³ [MJ/kg]	Brandentwicklung ⁴ t _α [s]	$\dot{q} = f(A)^5$ [kW/m ²]	Quelle
Drogerie- markt	geringe Anteile brennbarer Flüssigkeiten	760 / --- 1000 / ---	28 - 32	200	300	[4.8] [4.11]
Gaststätte	leichte Polstersitze, Holztische	600 - 700	18 - 25	200 - 300	280	[4.27]
Gaststätte	Polsterstühle, Holztische, Sitzgruppen, Wohnraumtextilien	1.100 / ---	17 - 20	200	330 - 620	[4.8]
Garderobe	ca. 12 m ²	720 / ---	21	180 - 250	430	[4.8]
kleiner Kiosk	ca. 15 m ²	650 / ---	22,5	200 - 300	285	[4.8]
Verkaufsstand	2 x 2 m	--- / ---	19,5	300	400	[4.26]

Erläuterung:

Brandlast: erste Zahl entspricht dem Mittelwert; zweite Zahl entspricht dem 90 %-Quantil (bei den EC-Daten [4.22] nach einer Gumbel-Verteilung)

Brandentwicklung: Steuergröße t_α nach DIN EN 1991-1-2, Anhang E.4. Diese Werte wurden, sofern sie in der Literatur nicht angegeben waren, über die Kurve für die Wärmefreisetzungsrate nach [4.8] bestimmt.

Sprinklerschutz: Da die Angaben zur Wärmefreisetzungsrate unter Sprinklerschutz sehr streuen und die damit im Zusammenhang stehenden Randbedingungen nicht umfassend in der Literatur erläutert sind, sollte die Brandleistung unter Sprinklerschutz nach Kapitel 7.3.3 bestimmt werden.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Tabelle A4.2 Angaben zur Brandentwicklung für ausgewählte Lagerungsarten unter Berücksichtigung der Lagerungshöhe (aus Versuchen im Maßstab 1:1 nach den angegebenen Quellen)

Waren	Lagerungsart	Lagerungshöhe [m]	Brandentwicklung	Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m ²]
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	0,5	mittel - schnell	1.249
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	1,5	schnell	3.746
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	3,0	schnell	6.810
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	4,9	schnell	10.215
Holzpaletten (Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.35]	gestapelt	0,46		1.420 *
Holzpaletten (Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.35]	gestapelt	1,52		4.000 *
Holzpaletten (Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.35]	gestapelt	3,05		6.800 *
Holzpaletten (Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.35]	gestapelt	4,88		10.200 *
Postsäcke, gefüllt [4.35]	gelagert	1,52		400 *
Kartons (compartmented) [4.35]	gestapelt	4,5		1.700 *

Waren	Lagerungsart	Lagerungshöhe [m]	Brandentwicklung	Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m ²]
PE-Briefablagekästen gefüllt [4.35]	gestapelt auf einem Wagen	1,5		8.500 *
PE-Müllfässer in Kartons [4.35]	gestapelt	4,5		2.000 *
PE-Fiberglas Duschtrennwände in Kartons [4.35]	gestapelt	4,6		1.400 *
FRP-Flaschen in Kartons verpackt [4.35]	gestapelt	4,6		3.400 / 6.200 *
PE-Flaschen in Kartons [4.35]	gestapelt	4,5		2.000 *
PU-Hartschaum-Isolationsplatten [4.35]	gestapelt	4,6		1.900 *
PU-Hartschaum Isolationsplatten [4.1]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	1.929,5
FRP-Gefäße in Kartons verpackt [4.35]	gestapelt	4,6		14.200 *
PS-Röhren ineinander geschachtelt in Kartons [4.35]	gestapelt	4,2		5.400 *
PS-Spielzeugteile in Kartons [4.35]	gestapelt	4,5		2.000 *
PS-Hartschaum-Isolationsplatten [4.35]	gestapelt	4,2		3.300 *
FRP-Röhren in Kartons verpackt [4.35]	gestapelt	4,6		4.400 *
PP und PE Folienrollen [4.35]	gestapelt	4,1		6.200 *
PE-Flaschen in unterteilten Kartons [4.33]	Regale	4,6	sehr schnell	6.242,5

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Waren	Lagerungsart	Lagerungshöhe [m]	Brandentwicklung	Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m ²]
PE-Flaschen in unterteilten Kartons [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	1.929,5
PS-Becher in unterteilten Kartons [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	13.620,0
PS-Hartschaum Isolationsplatten [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	4,3	sehr schnell	3.291,5
PVC-Flaschen in unterteilten Kartons [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	3.405,0
PP-Kübel in unterteilten Kartons [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	4.426,5
PP oder PE Folienrollen [4.33]	gestapelt / Blocklagerung	4,3	sehr schnell	3.972,5
Methyl-Alkohol [4.35]				600 *
Benzin [4.33]				2.500 *
Kerosin / Petroleum [4.33]				1.700 *
Schweröl, Nr. 2 [4.33]				1.700 *

PE: Polyethylen , PU: Polyurethan ; PS: Polystyrol; PP: Polypropylen;
 PET: Polyethylenterephthalat; HDPE: Polyethylen hoher Dichte;
 FRP/GFK: Glasfaser verstärkte Polyester

Hinweis: Die Brandentwicklung wächst mit steigender Lagerungshöhe

* Wärmefreisetzungsrate pro m² Grundfläche des vollständig beteiligten Brandgutes;
 basierend auf vernachlässigbarem radiativen Feedback der Umgebung und 100 %iger

Tabelle A4.3 Wärmefreisetzungsrate von Lagergütern bei unterschiedlicher Lagerhöhe

Erzeugnis	Lagerungsart/ Lagerungshöhe [m]	Wärmefreisetzungsrate [kW]
Holz oder PMMA [4.35]	vertikal / 0,61 m	100 je m Breite
	vertikal / 1,83 m	240 je m Breite
	vertikal / 2,44 m	620 je m Breite
	vertikal / 3,66 m	1.000 je m Breite
	Oberseite einer horiz. Fläche	720 je m ² Fläche
Polystyrol (fest) [4.35]	vertikal / 0,61 m	220 je m Breite
	vertikal / 1,83 m	450 je m Breite
	vertikal / 2,44 m	1.400 je m Breite
	vertikal / 3,66 m	2.400 je m Breite
	horizontal	1.400 je m ² Fläche
Polypropylen (fest) [4.35]	vertikal / 0,61 m	220 je m Breite
	vertikal / 1,83 m	350 je m Breite
	vertikal / 2,44 m	970 je m Breite
	vertikal / 3,66 m	1.600 je m Breite
	horizontal	800 je m ² Fläche

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Tabelle A4.4 Angaben zu Brandobjekten mit geringer Wärmefreisetzung (niedrig energetische Brände)

Objekt	Wärmefreisetzungsrate [kW]	Zeitintervall [s]	Quelle
Kopiergeräte	600 - 800	2.500 - 2.800	[4.26]
Papierkorb	30 - 45	180 - 450	[4.8]
PC-Bildschirm	45	900 - 1.500	[4.8]
Reisetasche	55 - 100	150 - 300	[4.8]
Schreibtischsessel ¹	65	200 - 450	[4.8]
PUR-Weichschaummatratze Deutsche Produktion	190	60 - 850	[4.8]
Federkernmatratze U.S.-Produktion	700	220 - 350	[4.26]

¹ teils mit sehr starker Rauchentwicklung brennend

Tabelle A4.5 Qualität von Beschreibungen der Bemessungsbrände (exemplarisch)

Realitätsbezug	Verfügbare Informationen	Methode	Anwendungshinweise
sehr hoch	Raumkonfiguration, brennbare Stoffe in der zu beurteilenden Lageranordnung, Ventilationsbedingungen, Zündquelle	objektspezifische, reproduzierbare Brandversuche mit risikogerechtem Versuchsaufbau und verwendbaren Messergebnissen	direkt verwendbares Zahlenmaterial ist vorhanden
hoch	Stoffdaten der Brandlasten in der zu beurteilenden Lageranordnung Anordnung der Brandlasten im Raum	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung	im Rahmen von Parameterstudien verwendbar
mittel	Annahmen zur Brandentwicklung für die Stoffgruppe	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung	im Rahmen von Parameterstudien verwendbar, unter verschärfenden Rechenannahmen oder Sicherheitsbetrachtungen
gering	Pauschale Angaben zur Nutzungsart des Raumes mit den typischen Brandlasten	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung	im Rahmen von Parameterstudien verwendbar, auf der sicheren Seite liegende Schätzwerte verwenden

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Tabelle A4.6 Beispiele aus der Literatur für Brandentwicklung und Wärmefreisetzung bei verschiedenen Teil-Nutzungen auf der Basis von Brandversuchen

Nutzung	Geschwindigkeit der Brandentwicklung	max. erreichte Abbrandleistung [MW]
PC-Arbeitsplatz; massive Möbel (Holzspanplatten); freie Verbrennung [4.36]	langsam	1,8
PC-Arbeitsplatz; massive Möbel (Holzspanplatten); Versuch in einem Raum mit ISO 9705-mäßigen Abmessungen [4.36]	langsam	2,5
PC-Arbeitsplatz in einem Großraumbüro; massive Möbel (Holzspanplatten) und mit brennbaren Wandschirmen unterteilt [4.29], [4.37]	schnell	6,8
Büro; Papier – Dokumentation auf Metallregalen; freie Verbrennung [4.36]	bis 200 s - mittel und nach 200 s - schnell	1,6
Büroeinheit; massive Möbel (Holzspanplatten); Versuch in einem Raum mit ISO 9705-mäßigen Abmessungen [4.36]	langsam	2,25
Verschiedene Büro-Gegenstände (Ausrüstung von Arbeitsplätzen); freie Verbrennung [4.29]	im Durchschnitt langsam	-
Mobile Metallregale mit Archivadokumenten [4.38]	schnell	-
Pkw in einem öffentlichen Parkhaus [4.43]	langsam	2,0 bis 5,5
Chemielabor [4.24]	sehr schnell	2,0
Diverse Ausstellungen [4.33]	langsam	-
Normales Bett in einem schwedischen Spital [4.40]	langsam	0,3

Tabelle A4.7 Angaben zu Brandlasten für verschiedene Nutzungen

Nutzung	Mittlere Brandbelastung q (MJ/m ²)	Quelle	Hinweis
Abstellraum für Büro und Gewerbebauten	500	[4.41]	
Autolackiererei	500	[4.41]	
Auto-Reparaturwerkstatt	300	[4.41]	[4.42] Tabelle 10-2, 90% Fraktilwert: 338 MJ/m ²
Baustofflager	270 ¹	[4.41]	Angabe in [4.32]: 800 MJ/m ³ [4.42] Tabelle 10-2, 90% Fraktilwert: 266 MJ/m ²
Datenverarbeitung, Rechenzentrum	400	[4.41]	
Labor, Chemie	500	[4.41]	
Kindergarten	300	[4.41]	
Möbelfabrik	550	[4.41]	
Wohnungskeller	900	[4.41]	

¹ Der Wert bezieht sich auf eine angenommene Lagerraumhöhe von 3 m

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Tabelle A4.8 Angaben zur Massenabbrandgeschwindigkeit

Beispiele zur Massenabbrandgeschwindigkeit v_{ab}	v_{ab} [kg/m ² min]	Heizwert H_i [kJ/kg]	Quelle
Büroraum mit Polstermöbeln oder Großgeräten sowie Wohn- und Schlafräume Brandausbreitungsphase Vollbrandphase	0,32 - 0,53 0,87	19020 Raumgrößen bis zu 40 m ²	[4.8]
Büroraum, einfach eingerichtet Brandausbreitungsphase Vollbrandphase	0,25 - 0,40 0,80	17300 Raumgrößen bis zu 40 m ²	[4.8]
Krankenzimmer Brandausbreitungsphase Vollbrand	0,21 - 0,38 0,52	18860	[4.8]
Verkaufsraum Brandausbreitungsphase Vollbrand	0,31 - 0,84 1,02	22000	[4.8]
Wellkartonagen, gefaltet gelagert mit brennbarem Inhalt	0,38 - 0,5	15120	[4.44]
	1,9 – 2,1	15120	[4.45]
Bücher auf Holzregalen	0,33	17300	[4.12]
Möbel in Räumen im Vollbrand	1,2	31300	[4.46]
Reifenstapel im Vollbrand	3,4	31300	[4.46]
Gummierzeugnisse 85%-Wert	0,7	31300	[4.47] [4.45]
Kautschuk als Profile und Dichtstreifen	1,24	39200	[4.8]
Schaumstoffmatratzen	0,62	19100	[4.8]
Polystyrolteile, hart	0,68	39600	[4.48]
Polystyrolschaum im Stapel, kleine Mengen Vollbrand, Stapel >10 m ³	0,4 – 0,7	39600	[4.45] [4.8]
	1,9 – 2,4		

Die Werte für die Brandausbreitungs- und für die Massenabbrandgeschwindigkeit gelten bei Anwendung auf Raumbrände nur bis zum Eintritt des Flashover und für lokale Brände bis zum Abbrand auf der gegebenen Fläche bei Lagerguthöhen von maximal 1,5 m bzw. Möbeln bis 1,8 m Höhe.

Tabelle A4.9 Normative Angaben zur rechnerischen Brandausbreitungsgeschwindigkeit

„klassifizierte“, normierte Brandausbreitungsgeschwindigkeit	v_{aus} [m / min]	Quelle
langsame Brandentwicklung DIN 18232	0,15	DIN 18232 Teile 2 und 5
mittlere Brandentwicklung DIN 18232	0,25	
schnelle Brandentwicklung DIN 18232	0,45	
DIN 18230-1	1,0	[4.6]
DIN EN 1991-1-2, Anhang E langsame Brandentwicklung	0,2 - 0,3	[4.6] [4.49]
DIN EN 1991-1-2, Anhang E mittlere Brandentwicklung	0,35 - 0,48	
DIN EN 1991-1-2, Anhang E schnelle Brandentwicklung	0,7 - 1,2	
DIN EN 1991-1-2, Anhang E sehr schnelle Brandentwicklung	1,8 - 3,0	[4.6]
DIN EN 1991-1-2, Anhang E Flashover	4,8 - 7,2	[4.6]

5 MODELLE FÜR DIE BRANDSIMULATION

5.1 Allgemeines

5.1.1 Überblick

Der Abschnitt 5 „Modelle für die Brandsimulation“ gliedert sich in sechs Unterkapitel.

In Kapitel 5.1 wird die wesentliche Zielsetzung der Brandmodellierung definiert.

Darauf aufbauend werden in Kapitel 5.2 die Grundlagen der Modellierung von Bränden dargestellt und hierbei die unterschiedlichen Modellarten beschrieben.

In Kapitel 5.3 werden die mathematischen Modelle nähergehend beschrieben, bzw. auf weiterführende Literatur verwiesen.

Das Kapitel 5.4 befasst sich mit der Validierung und Verifikation von mathematischen Modellen und zeigt anhand von Vergleichen zwischen Rechenergebnissen und experimentellen Ergebnissen auf, wie eine Modellbewertung praktisch durchgeführt werden kann.

Kapitel 5.5 gibt Hinweise für die Anwendung von Modellen einschließlich der Anforderungen an die Dokumentation.

In Kapitel 5.6 wird abschließend auf den Einfluss ausgewählter numerischer und physikalischer Randbedingungen auf die Berechnungsergebnisse der Brandmodelle eingegangen.

5.1.2 Zielsetzung der Brandmodellierung

Im Rahmen brandschutztechnischer Nachweise hat der Einsatz von Brandsimulationsmodellen einen hohen Stellenwert erreicht. Sie finden insbesondere Verwendung bei der Auslegung konkreter brandschutztechnischer Anforderungen, bei denen folgende allgemeine Zielsetzungen im Vordergrund stehen:

- Berechnung lokaler und globaler Temperaturwerte zur Beurteilung des Verhaltens von Bauteilen, Baustoffen und der Gefährdung von Personen.
- Beschreibung der Rauchausbreitung und Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen.

Für die Nachweisführung bei diesen brandschutztechnischen Fragestellungen müssen die Modelle eine Reihe unterschiedlicher Phänomene behandeln und Beschreibungen folgender Details von Brandprozessen anbieten:

- Verbrennungsprozesse,
- Wärmefreisetzungsraten und Brandausbreitung über brennbare Objekte,
- Wärmetransport durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung,
- Rauchgasmenge und Zusammensetzung,
- Entwicklung von Rauchgasschichten oder raucharmen Bereichen,
- Rußkonzentration oder Sichtweite innerhalb von Rauchgasen,
- Rauchausbreitung in andere Raumbereiche und

- Temperaturentwicklung an relevanten Punkten.

Aus dieser Auflistung wird deutlich, dass die Brandmodellierung auf den grundlegenden Gesetzmäßigkeiten von Chemie und Physik (inklusive Thermodynamik) aufbaut, bzw. diese repräsentieren soll. Über die praktischen Anwendungen (z. B. Auslegung von Bauteilen und Entrauchungsmaßnahmen) hinaus lassen sich Brandsimulationsmodelle deshalb auch einsetzen, um die Wechselwirkung verschiedener Prozesse zu studieren. Ein Beispiel dafür sind die Rückwirkungen der Temperaturentwicklung oder der Ventilation auf den Brandverlauf.

In der Praxis ergeben sich daraus sehr unterschiedliche Problemstellungen, für die unterschiedliche Modelle zur Verfügung stehen. Diese Modelle unterscheiden sich einmal aufgrund ihrer Struktur, dem Grad von Vereinfachungen oder einfließenden Annahmen und innerhalb ähnlich aufgebauter Modelle auch durch unterschiedliche Programmcodes. Ziel dieses Kapitels ist es daher, die wesentlichen Grundlagen zu beschreiben, die Modelle nach ihrer Struktur zu ordnen und Hinweise für deren Anwendung zu geben.

5.2 Grundlagen der Modellierung von Bränden

5.2.1 Allgemeines

Unter einem Modell im wissenschaftlichen Sinn versteht man ganz allgemein ein Objekt, welches auf der Grundlage einer Analogie zu einem Original eingesetzt und genutzt wird, um Aufgaben zu lösen, deren Durchführung am Original selbst nicht möglich oder zu aufwendig sind. Bei den hier zur Diskussion stehenden Fragestellungen handelt es sich um die physikalische bzw. mathematische Nach- oder Abbildung der Realität durch mathematische Gleichungen oder Nachbauten in verkleinertem Maßstab. Die Modelle dienen dazu,

- neue Informationen über das Original zu erhalten,
- Zusammenhänge aufzudecken oder zu erklären,
- Eigenschaften des Originals aufzeigen, die am Original nicht zugänglich oder messbar sind,
- das Original zu optimieren,
- Hypothesen zu überprüfen,
- den Einsatz von Teilsystemen zu prüfen und
- Grundlagen für die Planung schaffen.

Auch Brandphänomene können mit Hilfe physikalischer oder mathematischer Modelle dargestellt werden. Die Grundlagen der Abbildung bilden dabei die bestehenden Naturgesetze, wobei modellspezifische Annahmen, Näherungen oder Vereinfachungen beteiligt sind.

Im Nachfolgenden werden zunächst die Grundlagen eines Brandes dargelegt. Hierauf aufbauend werden grundlegende Vorgaben und Modellannahmen beschrieben, die bei Modellen zur Brandsimulation getroffen werden. Die grundsätzlichen Eigenschaften von mathematischen und physikalischen Modellen werden in Kapitel 5.2.4 und 5.2.5 dargelegt.

5.2.2 Grundlagen des Brandes

Für das Verständnis von Brandmodellen ist die Beschreibung der bei Brandprozessen wesentlichen physikalischen Vorgänge grundlegend. Deshalb wird im Folgenden ein kurzer Überblick über die zu beschreibenden Phänomene gegeben.

Die grundlegende Voraussetzung für die Entstehung eines Brandes lässt sich anhand des Brandquadrats aufzeigen (Bild 5.1). Ein brennbarer Stoff und Sauerstoff im richtigen Mischungsverhältnis sowie eine Initialenergie müssen zu einer sich selbsterhaltenden chemischen Kettenreaktion führen, sodass die Verbrennungsreaktion zwischen brennbarem Stoff und Sauerstoff aufrechterhalten wird. Die Verbrennung erfolgt hierbei im Allgemeinen in einem Gemisch gasförmiger Stoffe.

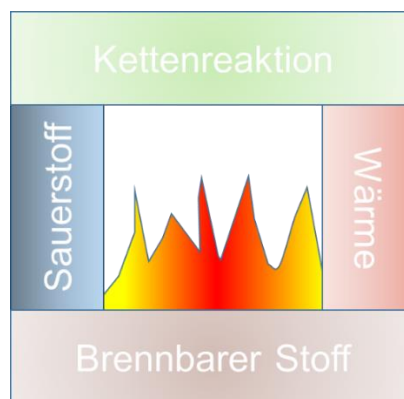


Bild 5.1: Brandquadrat

Bei Verbrennungsreaktionen, wie sie im Brandschutzingenieurwesen Beachtung finden, liegt der Brennstoff zu Beginn der Verbrennungsreaktion nicht in gasförmiger Form vor. Um das notwendige Mischungsverhältnis zwischen Sauerstoff und brennbarem Stoff zu erreichen, müssen zunächst flüssige und feste Stoffe in gasförmigen Brennstoffe umgewandelt werden.

Bei flüssigen Stoffen geschieht dies durch Verdampfung. Bei der Verdampfung handelt es sich um eine endothermische Reaktion, d. h. es wird zusätzlich Energie benötigt, um Flüssigkeiten in einen gasförmigen Zustand zu überführen. Diese Energie wird als latente Verdampfungswärme bezeichnet und ist eine physikalische Materialeigenschaft. Der Verdampfungsprozess ist neben der Temperatur auch vom partiellen Dampfdruck abhängig und kann durch das Clausius-Clapeyron Gesetz beschrieben werden:

$$\ln(p_v) = -\frac{L_v}{RT} + C \quad (5.1)$$

Mit:

p_v : partieller Dampfdruck

L_v : temperaturunabhängige Verdampfungsenthalpie [J/kg]

R : allgemeine Gaskonstante [J/(kg·K)]

T : Temperatur [K]

C : materialabhängige Konstante

Neben der Verdampfung, bei der mit dem Phasenwechsel keine chemische Änderung des Ausgangsstoffes verbunden ist, können sich Stoffe unter thermischer Einwirkung zu anderen zersetzen. Bei diesen Pyrolyse genannten Zersetzungsprozessen können neben flüssigen und festen auch gasförmige Stoffe freigesetzt werden. Im Brandschutzingenieurwesen ist insbesondere die Pyrolyse von festen Stoffen von Bedeutung (z. B. Holz).

Die Pyrolyse von festen Stoffen entspricht in den meisten Fällen einem endothermischen Prozess, der durch mehrere chemische Reaktionen kontrolliert werden kann. Dieser Ansatz kann durch das Arrhenius-Gesetz beschrieben werden, in welchem die Temperaturabhängigkeit der relativen Zersetzungsrate eines Stoffes durch eine einfache Beziehung beschrieben wird:

$$\dot{m}'' = \rho_s \cdot A \cdot Y_O^m Y_S^n e^{-E/(R \cdot T)} \quad (5.2)$$

mit

R = universelle Gaskonstante [J/(mol K)], = 8,314 J/(mol K),

T = Temperatur der Oberfläche des Stoffes [K],

E = Aktivierungsenergie [J/mol],

A = vor-exponentieller Faktor [m/s],

ρ_s = Dichte des Stoffes [kg/m³].

Y_O und Y_S repräsentieren die Massenanteile des an der Zersetzung beteiligten Sauerstoffs und Brennstoffs und m und n sind Konstanten. Für manche Stoffe besteht eine Abhängigkeit der Zersetzung von der Sauerstoffkonzentration, für manche nicht, in diesen Fällen ist m = 0. Die Zersetzung eines (heterogenen) Stoffes erfolgt thermisch betrachtet oft innerhalb mehrerer Temperaturbanden (Zersetzungsstufen), sodass die Gleichung (5.2) ggf. mehrfach und parallel je nach Stoffzusammensetzung durchlaufen wird. Für die jeweils charakteristischen Zersetzungstemperaturen müssen dann entsprechende Aktivierungsenergien E und vor-exponentielle Faktoren A bekannt sein. Verfahren zur Ableitung dieser Größen existieren z. B. auf Grundlage der Thermogravimetrischen Analyse (DIN 51006).

Ein Brand wird i. A. nicht erlöschen, solange genügend Brennstoff und Luftsauerstoff vorhanden ist und genügend Energie auf die Brennstoffoberfläche zurückgeführt wird, um weiteren gasförmigen Brennstoff zu erzeugen. Ist zudem bei ausreichendem Sauerstoffangebot noch unverbrauchter Brennstoff vorhanden, dann wächst der Brand weiter an, bis es durch die Brandlastanordnung oder durch Eingriff von außen eine Begrenzung erfährt.

Mit dem Verbrennungsvorgang ist die Flammen- und Plumbildung verknüpft. Der Plume (Rauchgassäule) wird durch die aufsteigenden heißen Gase und die mitgeführten festen und flüssigen Bestandteilen gebildet, deren Massenstrom sich durch eingemischte Umgebungsluft vergrößert. Diese Beimischung resultiert aus einer Impulsübertragung in Querrichtung, die am Rand dieser Strömung, in der so genannten Grenzschicht, Umgebungsluft mitführt und auf der Zähigkeit des Mediums (Gas) beruht. Durch die turbulente Strömung und Diffusion mischt sich in der Flamme die Umgebungsluft mit den Brennstoffgasen. Dadurch wird die Verbrennung ermöglicht, welche wiederum die Wärmeenergie freisetzt. Ein großer Anteil dieser entstehenden Wärme wird von den Gasen innerhalb der Verbrennungszonen absorbiert und erhöht dadurch die Temperatur der Gase und der darin enthaltenen Partikel. Dies führt zu dem bereits geschilderten Auftrieb der Gase und Partikel und der Einmischung. Da sich die aufsteigende

Strömung oberhalb der Flamme fortsetzt (Plume), wird durch die Beimischung von Umgebungsluft der Plume-Massenstrom ständig erhöht. Da oberhalb der Flamme keine Verbrennung mehr stattfindet, nimmt die Temperatur im Plume mit der Höhe ab, wenn außerhalb des Plumes Umgebungstemperaturen herrschen. Dies ist eine Folge der Energieerhaltung.

Die Heißgase steigen bei genügend großem Auftrieb solange in vertikaler Richtung auf, bis sie auf die Raumdecke auftreffen. Dies wird nur dann verhindert, wenn der Auftrieb relativ zu auftretenden Temperaturgradienten oder Luftströmungen sehr schwach ist. Bei zunehmender Brandleistung bildet sich in der Regel aber eine Plume-Strömung bis zur Decke aus. An dieser Stelle können sich die Rauchgase nur noch in horizontaler Richtung ausbreiten. Die treibende Kraft dieser als Ceiling Jet bezeichneten Strömung ist nach wie vor der Auftrieb (Dichtedifferenz zur Umgebungsluft). Da diese Strömung ebenfalls turbulent ist, werden Wirbel produziert, die neben der horizontalen Komponente auch eine vertikale Komponente aufweisen. Bei ausreichendem Dichtenunterschied und ungestörter Ausbreitung bildet sich eine Rauchgasschicht unterhalb der Decke aus. Diese Rauchgasschicht wächst weiter an, solange der Brand nicht ausgeht oder eine Rauchabfuhr erfolgt. Diese Rauchgasschicht gibt Wärme an die Decken, Wände und andere Objekte ab und zwar sowohl konvektiv als auch radiativ. Erreichen die Rauchgase eine Öffnung, dann wird Wärme auch durch die ausströmenden Rauchgase abgegeben.

Bei ansteigender Temperatur nimmt auch die Wärmestrahlung zu, die nicht nur auf die Umfassung innerhalb der Rauchgasschicht auftrifft, sondern auch auf alle Objekte unterhalb der Rauchgasschicht. Diese Wärmestrahlung hat nicht nur einen signifikanten Effekt auf die Abbrandrate des brennenden Objekts, sondern kann auch weitere brennbare Objekte entzünden (Flash-over). Die Wärmestrahlung hat daher auch direkte Auswirkung auf die Brandausbreitung auf den relevanten Objekten. Andererseits empfängt die Rauchgasschicht auch Wärmestrahlung aus der Flamme, genauso wie die Umfassungsbauteile. Die Temperatur der Rauchgase bestimmt sich aus dieser Energiebilanz.

Wie bereits beschrieben, wächst die Rauchgasschicht oder ein durch Rezirkulationsprozesse geprägtes Rauchgasvolumen mit uneinheitlicher Konzentration an Rauchgasbestandteilen innerhalb des Raumes an, bis Öffnungen entstehen oder erreicht werden. Bis zu diesem Zeitpunkt nimmt der Druck zu, danach erhält man im oberen Raumbereich Überdruck und im unteren Raumbereich einen Unterdruck, der durch eine Ebene getrennt wird, bei der der Innendruck gleich dem Außendruck ist. Diese sogenannte neutrale Ebene ist eine Idealisierung, da sie nicht zwangsläufig glatt und eben ausfällt. Unterhalb dieser neutralen Ebene fließt nun frische Umgebungsluft durch die Öffnung zu, die zur Verbrennung benötigt wird. Ist dieser Zustrom nicht ausreichend für die Verbrennung, spricht man von einer sauerstoffkontrollierten Verbrennung, bei der sich die Zusammensetzung der Brandprodukte verändert. Die nachströmende Zuluft kann, je nach Lage und Anordnung der Öffnungen, die Rauchgasströmung ebenso beeinflussen wie der Plume.

5.2.3 Modellannahmen und -vereinfachungen

Für alle Modelle gilt, dass grundsätzliche Vorgaben gemacht werden müssen. Dazu gehören neben den Start- und Anfangsbedingungen (Temperatur, Druck etc.) und den Randbedingun-

gen wie Quellen (Brand, Zuluft, Heizung etc.) und Senken (RWA, Kühlung etc.) die Gebäudegeometrie, Wände, Öffnungsflächen und die Stoffdaten der Begrenzungen und deren Darstellung im Modell. Da komplexe Geometrien nicht in jedem Fall völlig identisch zu dem Original darstellbar sind, müssen die wesentlichen Elemente der Geometrie vom Anwender beurteilt und erfasst werden. Für diesen Arbeitsschritt ist es notwendig, die physikalischen Grundlagen des jeweiligen Modells zu kennen, um eine Entscheidung bezüglich der wesentlichen Merkmale treffen zu können.

Hinsichtlich des Umfangs der Eingabedaten können sich die Modelle beträchtlich unterscheiden. Während beim Zonenmodell im Wesentlichen darauf zu achten ist, in welcher Form eine komplexe Geometrie geeignet vereinfacht werden kann und welche Lage die Öffnungsflächen haben, ist bei den anderen Modellen u. U. ein höherer Aufwand an Vorüberlegungen notwendig. Bei den Computational Fluid Dynamics (CFD)-Modellen geht es beispielsweise um konkrete Festlegungen von mathematischen Randbedingungen bezüglich der Geschwindigkeit, des Drucks und thermischer Randbedingungen. Bei den physikalischen Modellen steht ohnehin der möglichst naturgetreue Nachbau im Vordergrund. Allerdings besteht hier die Schwierigkeit darin, die vorkommenden Ähnlichkeitsgrößen zu erfüllen. Dazu sind u. U. andere Materialzusammenstellungen für die Umfassungen notwendig.

Wesentlichste Eingabe ist der Brandverlauf und die damit in Verbindung stehenden Stoffdaten. Hinsichtlich des Brandverlaufs ist eine Modellierung der Verdampfungs- und Pyrolyseprozesse, welche auf fundamentalen Materialeigenschaften beruhen, heute nur in sehr begrenztem Umfang möglich. Die Modellierung dieser Prozesse spielt zurzeit praktisch nur im Wissenschaftsbereich eine Rolle und ist für allgemeine Vorhersagen nur begrenzt einsetzbar. Die praktische Anwendung steht zudem vor dem Problem, dass eine Kenntnis über die Zusammensetzung und Anordnung der Stoffe zu einem spezifischen Zeitpunkt normalerweise nicht zur Verfügung steht. Man hat sich daher einen anderen Zugang zu der Problemstellung verschafft, in dem man ausgehend von Experimenten bestimmte Brandverläufe unterstellt oder phänomenologische Ansätze (siehe Kapitel 4 „Brandszenarien“) verwendet, die für bestimmte Anwendungsbereiche abdeckend sind. Ausgehend von der vorliegenden Nutzung wird auf typische Brandlasten geschlossen, denen eine pro Zeiteinheit in Wärmeenergie umgesetzte Menge an Brandgut (Abbrandrate oder Wärmefreisetzungsrage) zugeordnet wird. Es wird somit nicht das Brandphänomen als solches berechnet, sondern die Folgen der in ein Berechnungsgebiet vordefiniert eingebrachten Menge an Energie und Masse.

Bei der Untersuchung der Brandausbreitung über mehrere Objekte sind darüber hinaus detailliertere Angaben notwendig, welche beispielsweise die Wärmeübertragung oder die Entzündung beeinflussen.

Bei der Modellierung der Verbrennung, sofern diese im jeweiligen Modell berücksichtigt wird, steht man bei der praktischen Anwendung vor dem Problem, dass die im realen Brandfall ablaufenden Verbrennungsreaktionen im Voraus nicht bekannt sind. Bei Mischbrandlasten, die typisch für Fragestellungen im Brandschutzingenieurwesen sind, können mehrere hunderte Reaktionen zeitgleich ablaufen und somit nicht sinnvoll berechnet werden. Anstattdessen wird eine Reaktion stellvertretend berechnet und experimentell bestimmte Werte für die Ruß- und CO-Freisetzung berücksichtigt.

Bei jedem Brandverlauf ist daher i. a. festzustellen, ob genügend Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung des Brandgutes zur Verfügung steht. Wenn genügend Sauerstoff vorhanden ist, findet in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Brandgutes eine mehr oder minder vollständige Verbrennung statt, und der Brandablauf ist brandlastgesteuert. Bei Sauerstoffmangel stellt sich dagegen ein ventilationsgesteuerter Brand ein. Dies führt zu einer unvollständigen Verbrennung, bei der u. a. größere Mengen von CO und gasförmige, unverbrannte Kohlenstoffverbindungen in die Rauchgase gelangen. Ebenso fallen je nach Art des Brandgutes Ruß und Asche an. Die weitergehenden Stoffdaten bezüglich der Entstehung von Verbrennungsprodukten sind daher von der Ventilation abhängig. Alle diesbezüglichen Eingangsdaten wie die Ausbeuten von Ruß, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Verbrennungseffektivität, Heizwert und Strahlungsanteil müssen je nach Randbedingung verändert oder konservativ gewählt werden.

Neben diesen häufig angewendeten Modellannahmen und –vereinfachungen existieren je nach gewählten Modell weitere Modellannahmen und –vereinfachungen, die Einfluss auf das Berechnungsergebnis nehmen. Bei der Auswahl der Modelle und Submodelle ist daher zu prüfen, welche Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis damit verbunden sind. Dies soll an einer weit verbreiteten Modellannahme aus dem Bereich der CFD-Modelle verdeutlicht werden:

Um den Berechnungsaufwand zu verringern, kann für Brände die Annahme getroffen werden, dass die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten deutlich geringer als die Schallgeschwindigkeit sind („low mach number assumption“). Diese Annahme hat sich für Brände grundsätzlich bewährt, jedoch ist damit die Berechnung von schnell ablaufenden Verbrennungsprozessen (Deflagrationen oder Detonationen) nicht möglich.

5.2.4 Mathematische Modelle

Mathematische Modelle bestehen aus einem System von Gleichungen, welche die auftretenden Phänomene anhand der maßgebenden Parameter beschreiben. Die Gleichungssysteme sind die mathematische Form der Naturgesetze. Meistens ist die Struktur dieser Gleichungen schon derart komplex, dass sie nur numerisch gelöst werden können. Daher wird unter Modell oft auch der zugehörige Computercode in einer bestimmten Programmiersprache verstanden.

Mathematische Brandmodelle können noch weiter unterteilt werden in deterministische und probabilistische Modelle. Deterministische Modelle beschreiben die Brandentwicklung und den Brandverlauf für eine spezielle, vom Benutzer in Form von Rand- und Anfangsbedingungen zu präzisierende Ausgangssituation, welche die zeitliche Entwicklung des betrachteten Systems festlegen. Sie bestehen aus einer Zusammenstellung mathematischer Algorithmen, welche die als relevant eingeschätzten physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Abhängigkeiten beschreiben. Die deterministischen Modelle können sich erheblich in ihrer Komplexität unterscheiden.

Die probabilistischen Modelle beschreiben Brände als eine Folge von Ereignissen und simulieren die Brandentwicklung auf der Basis von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Ereignisse sowie Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen bestimmten Zuständen. Die Schwierigkeit bei dieser Art von Modellen besteht allerdings darin, die entsprechenden

Wahrscheinlichkeiten aus statistischen Auswertungen von Beobachtungen oder Versuchsergebnissen bzw. aus Zuverlässigkeitsanalysen zu ermitteln. Sie sind im Sinne der oben formulierten Fragestellungen bei ingenieurtechnischen Nachweisen aus diesem Grunde noch nicht relevant und werden daher im Folgenden nicht behandelt.

Grundsätzlich lassen sich drei Gruppen von mathematischen deterministischen Brandsimulationsmodellen unterscheiden:

- Empirisch belegte Ansätze,
- Zonenmodelle,
- CFD-Modelle

Bei den empirischen Ansätzen handelt es sich um Verfahren, die aufgrund von Experimenten bezüglich einer spezifischen Fragestellung gewonnen werden. Beispiele dafür sind die Beschreibung von Flammenhöhen, Wärmestrahlung und Rauchgasmassenströme in Abhängigkeit von der Brandintensität, den geometrischen Gegebenheiten und den Anfangs- und Randbedingungen. Daraus ergeben sich empirisch belegte Modellansätze für spezielle Problemstellungen, die teilweise selbst Bestandteil von komplexeren Rechenverfahren sind.

Zonen- und CFD-Modelle unterscheiden sich dadurch, dass die CFD-Modelle im Allgemeinen unmittelbarer auf den fundamentalen Gleichungen beruhen, während die Zonenmodelle vereinfachte Gleichungssysteme beinhalten, die mit Hilfe der empirischen Ansätze aus den fundamentalen Gesetzen entwickelt wurden. Daraus ergibt sich eine unterschiedliche mathematische Struktur und demzufolge unterschiedliche Lösungsverfahren. Diese Unterschiede sind auch für die Anwendbarkeit auf bestimmte Fragestellungen und den Detaillierungsgrad der jeweiligen Modelle verantwortlich.

5.2.5 Experimentelle Modelle

Das experimentelle Modell beschreibt eine reale Situation unter Berücksichtigung von Skalierungen und Ähnlichkeitsgesetzen (z. B. Nachbau in verkleinertem Maßstab). Ein bekanntes Beispiel aus dem Forschungsbereich der Strömungsmechanik sind Windkanalversuche, bei denen die Reynoldszahl als Skalengesetz benutzt wird. In der Brandforschung ist jedoch eine ganze Reihe von Ähnlichkeitsgesetzen zu beachten. Dies hat in der Regel zur Folge, dass eine Modellierung nur für einen bestimmten Teilaspekt widerspruchsfrei erfolgt und andere Aspekte nur näherungsweise erfüllt sind.

Die mit zunehmender Anzahl durchgeführten „Heißrauchversuche“ lassen sich ebenso als experimentelles Modell einordnen. Hierbei werden zwar reale Geometrien berücksichtigt, allerdings wird die freigesetzte Wärme im Vergleich zu einem realen Brandereignis nach unten skaliert. Dies hat zur Folge, dass bei der Bewertung solcher Versuche, die Ähnlichkeitsgesetze zu beachten sind und das Versuchsergebnis nicht direkt auf eine Bemessungssituation übertragen werden kann.

In der Anlage A5.2 werden die „Experimentellen Modelle“ einer detaillierteren Betrachtung unterzogen. Schwerpunkt in dieser Darstellung haben die experimentellen Modelle im verkleinerten Maßstab.

5.3 Beschreibung der mathematischen Modelle

5.3.1 Allgemeines

Mathematische Modelle beschreiben die im Brandfall ablaufenden Prozesse anhand von mathematischen Gleichungen. Dabei basiert jede Form der Modellierung von Brandprozessen auf den fundamentalen Gesetzmäßigkeiten, die sich aus den Erhaltungssätzen für Masse, Impuls und Energie ergeben. Diese Gleichungen sind für die bei Brandprozessen anstehenden Fragestellungen jedoch so komplex, dass eine Lösung mittels einfacher mathematischer Operationen nicht möglich ist. Zur Lösung stehen drei Vorgehensweisen zur Verfügung, nämlich

- numerische Lösung der fundamentalen Gleichungen,
- Vereinfachungen der Gleichungen und
- Ableitung von Gleichungen aus Beobachtungen von Brandversuchen.

Vereinfachend ausgedrückt führen der erste Ansatz zu den CFD-Modellen und der zweite Ansatz zu den Zonenmodellen, bei denen insbesondere der Impulserhaltungssatz in der allgemeinen Form nicht mehr berücksichtigt wird. Auch bei den CFD-Modellen sind jedoch Unterschiede hinsichtlich des Umfangs der berücksichtigten Fundamentalgleichungen zu verzeichnen.

5.3.2 Empirische Korrelation

Einfache empirische Gleichungen (aus Experimenten abgeleitete Korrelationen) als Hilfsmittel des modernen Brandschutzingenieurwesens sind das Ergebnis einer Vielzahl detaillierter Untersuchungen des Brandgeschehens, welche eine möglichst quantitative Beschreibung der Vorgänge zum Ziel haben. Die Beschreibung als einfache oder besser gesagt, als vereinfachte Ansätze rührt daher, dass sie durch Vereinfachungen aus den fundamentalen Gleichungen hervorgehen und unbestimmte Konstanten und Parameter experimentell festgelegt werden. Mit Hilfe dieser Ansätze kann beispielsweise der Plume-Massenstrom in einer bestimmten Höhe berechnet oder die Plume-Temperatur bestimmt werden. Die Zusammenfassung dieser einfachen Gleichungen ermöglicht oftmals ein ausreichendes Verständnis der Vorgänge, ohne ein komplexes Gleichungssystem lösen zu müssen. Beispiele dafür sind Handkalkulationen für die Entrauchung nach Yamana und Tanaka [5.1] oder weitergehende Kalkulationsverfahren, wie sie von der Fire Research Station vorgeschlagen werden [5.2]. Darüber hinaus stellen sie Grundlagen und nützliche Ergänzungen für die Zonenmodellierung dar. Wie eingangs schon erwähnt, existieren eine Vielzahl solcher Ergebnisse mit aktueller Ergänzung, deren vollständige Darstellung aber nicht Ziel dieses Kapitels ist. Die im Anhang A5.1 dargestellten einfachen analytischen Ansätze sind daher diejenigen, denen bei vielen praktischen Anwendungen eine besondere Bedeutung zukommt. Sie behandeln im Wesentlichen die oberhalb eines Brandherds entstehenden Bedingungen hinsichtlich der Verbrennung, Rauchgasproduktion und der Temperaturentwicklung und sind Bestandteil der theoretischen und experimentellen Betrachtungen zur Ausbildung des Plumes, der sich oberhalb einer Brandfläche oder Brandquelle ausbildet. Dieser Plume entsteht aufgrund der bei dem Verbrennungsprozess freigesetzten Wärme, die, nach Überschreitung eines gewissen Mindestwerts, über eine lokale Temperaturerhöhung zu einer nach oben gerichteten Konvektionsströmung führt. Sie umfasst

neben der Verbrennungszone (Flammenbereich) auch den darüber liegenden Teil der Auftriebsströmung. Die dargestellten Zusammenhänge sind Gegenstand vieler Aufsätze und sind beispielsweise zusammenfassend in [5.3], [5.4], [5.5] behandelt. Die auf diesem Strömungsweg vorherrschenden Prozesse bestimmen die Rauchgasproduktion und die Temperaturentwicklung. Diese für die Anwendung wichtigen Submodelle zur Beschreibung von Brandwirkungen sind Gegenstand der im Anhang A5.1 zusammengefassten Erläuterungen. Bei Anwendung dieser Ansätze sind deren Gültigkeitsbereich und die mitunter angegebene Fehlergrenze zu beachten.

5.3.3 Vollbrandmodell

5.3.3.1 Allgemeines

Das Einzonenmodell, das besser bekannt ist unter dem Namen Vollbrandmodell oder in der englischsprachigen Literatur post-flashover model, stand am Anfang der theoretischen Brandforschung. Die grundlegende Voraussetzung für die Anwendung eines Ein-Zonen- oder Vollbrandmodells ist eine möglichst gleichförmige Temperatur innerhalb des Brandraums. Dies ist i. A. nur in der Vollbrandphase näherungsweise erfüllt, daher der Name.

Entsprechend der praktischen Erfahrung bei vollentwickelten Bränden in kleineren Räumen wird vorausgesetzt, dass der Raum gleichmäßig mit heißen Rauchgasen gefüllt ist: das gesamte Brandraumvolumen wird als eine Zone (Kontrollvolumen) betrachtet, in der homogene Verhältnisse (z. B. Temperatur, Gaszusammensetzung) herrschen. Die wesentlichen Annahmen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Brandgase und die Flammen im Brandraum sind gut durchmischt, sodass sich eine einheitliche Temperatur einstellt.
- Die Emissivität der Rauchgase und der Flammen ist gleich und während des Brandverlaufes konstant.
- Die Innenwände sind graue Strahler mit einer konstanten Emissivität.
- Neben dem radiativen Wärmeaustausch zwischen Gas und Wand existiert außerdem ein konvektiver Austausch.
- Die Außenseite der Umfassung wird durch konvektiven Wärmeaustausch gekühlt.

Die für die mathematische Beschreibung notwendigen physikalischen Variablen sind nachstehend zusammengefasst, wobei statt der inneren Energie auch die Enthalpie als kennzeichnende Größe herangezogen werden kann:

T	Temperatur der Gasmischung (Rauchgase) im Rauch,
m	Masse des Rauchgases innerhalb des Raumes,
V	Volumen des Raums (konstant),
E	innere Energie des Rauchgases im Raum,
ρ	Dichte des Gasgemisches,
c_v	spezielle Wärme bei konstanten Volumen

5 Modelle für die Brandsimulation

R	allgemeine Gaskonstante,
p	Druck im Raum und
Z_n	Lage der neutralen Ebene.

Zusätzlich wird der Massenaustausch zwischen dem Raum und der Umgebung betrachtet. Da die Lage der neutralen Ebene durch gleichen Druck zwischen innen und außen definiert ist, kann unterhalb dieser Ebene Luft zuströmen (m_{in}) und oberhalb ausströmen (m_{out}). Mit diesem Massenaustausch ist auch ein Energieaustausch verbunden (Q_c), der durch zusätzliche Energieverluste aufgrund von Strahlung (Q_R) vergrößert wird. Die physikalischen Größen, welche das System beschreiben, sind in der Mitte von Bild 5.2 zusammengefasst und gelten als gleichbleibend über den gesamten Raum. Sie können durch zusätzliche Variablen wie beispielsweise die Sauerstoffkonzentration, ergänzt werden. Zur Berechnung der genannten physikalischen Größen stehen der Energieerhaltungssatz und der Massenerhaltungssatz zur Verfügung, die durch folgende Beziehungen zwischen den Variablen vervollständigt werden:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Dichte,} \quad (5.3)$$

$$E = c_v \cdot m \cdot T \quad \text{innere Energie bei konstantem Volumen,} \quad (5.4)$$

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad \text{Zustandsgleichung für ideale Gase} \quad (5.5)$$

Die Temperatur und die Masse des Gasgemisches werden schrittweise aus den oben genannten Erhaltungsgleichungen berechnet, wobei zusätzliche Gleichungen zur Beschreibung des Energieverlusts an die Wände (konvektiv und radiativ) und des Austauschs von Masse und Energie mit der Umgebung notwendig sind. Diese zusätzlichen Gleichungen werden als Submodelle bezeichnet. Diese Submodelle resultieren ebenfalls aus vereinfachten Betrachtungen und gelten unabhängig von den allgemeinen Modellannahmen, sie sind z. T. empirisch begründet. Zu den typischen Submodellen für Vollbrandmodelle gehören:

- Beschreibung der bei einem Brand freigesetzten Energie
- Massenaustausch mit der Umgebung
- Energieabgaben an die Umfassungswände

Obwohl der Druck im Raum näherungsweise als konstant angenommen wird, sind kleine Druckunterschiede über der Raumhöhe verantwortlich für den Austausch von Massen zwischen dem Raum und seiner Umgebung. Dieser Massenaustausch wird auf der Grundlage der Bernoulligleichung berechnet.

Für die Berechnung des Energieverlustes über die Oberfläche des Raumes muss die auftretende Wärmestromdichte als Summe (konvektiv und radiativ) berechnet werden. Hier wird eine Bilanz aller Zonen erstellt, die Wärme aufnehmen oder abgeben. Die Beschreibung des Wärmetransports durch die Wand erfolgt über die Lösung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung. Der Wärmeverlust durch Öffnungen wird dann über die austretenden Massenströme (konvektive) und durch den entsprechend der Öffnungsfläche austretenden Strahlungsanteil berücksichtigt.

Um einen vertieften Einblick in die Berechnungsmethoden im Brandschutz zu gewinnen, ist es zweckmäßig, sich mit den thermodynamischen Grundlagen der Berechnungen für einfache Geometrien vertraut zu machen. Das hier vorgestellte Einraummodell ist gewissermaßen die Urzelle der Mehrzonen- bzw. Mehrraummodelle. Im Folgenden werden zunächst für einen Vollbrand in einem Raum die Energiebilanz und die Massenbilanz aufgestellt und beschrieben. Dabei ist angenommen, dass der Raum mit einer Öffnung mit der Umgebung in Verbindung steht, und dass die Temperaturen im Raum homogen sind.

5.3.3.2 Energiebilanz- und Massenbilanzgleichung

Das generelle Konzept besteht wie gesagt darin, die Rauchgastemperatur aus der Energiebilanz zu bestimmen. Eine anschauliche Darstellung dieser Energiebilanz zeigt Bild 5.2.

Die innere umschließende Fläche wird mit A_j , die Fensterfläche mit A_w bezeichnet. Es wird vorausgesetzt, dass die Wand- und Deckenflächen so geartet sind, dass die Wärmeverluste durch die eindimensionale instationäre Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden können.

Für die Energiebilanz ergibt sich mit diesen Annahmen aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_i + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0 \quad (5.6)$$

Folgende Energieterme sind darin enthalten:

- \dot{h}_c die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandnebenscheinungen im Brandraum freigesetzte Energie,
- \dot{h}_i die durch den Gaswechsel (Konvektion durch Öffnungen) pro Zeiteinheit abströmende Energie der Rauchgase (Konvektionsenergie),
- \dot{h}_o die durch die Fensterstrahlung pro Zeiteinheit entzogene Energie,
- \dot{h}_w die durch die Konvektion und Strahlung an die Umfassungsbauteile pro Zeiteinheit abgegebene Energie,
- \dot{h}_g die im Brandraum pro Zeiteinheit gespeicherte Energie der Rauchgase, welche die Brandraumtemperatur bestimmt,
- \dot{h}_s sonstige pro Zeiteinheit verlorene Energieanteile (z. B. Speicherenergie von Einbauten).

Die Gleichung der Massenbilanz im Brandraum ist durch

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_i + \dot{R}) = 0 \quad (5.7)$$

gegeben. Darin sind die zeitlichen Änderungen der folgenden Massenanteile enthalten:

- \dot{m}_g die pro Zeiteinheit aus dem Brandraum strömenden Rauchgasmengen,
- \dot{m}_i die pro Zeiteinheit in den Brandraum einströmenden Frischluftmengen,

\dot{R} die pro Zeiteinheit umgesetzte Brandlast, welche die Wärmefreisetzung bewirkt.

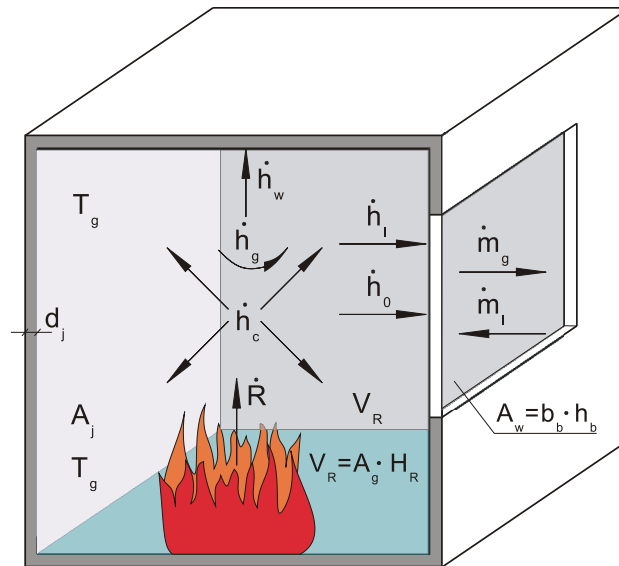


Bild 5.2 Geometrie, Wärme- und Massenströme des Wärmebilanzmodells [5.37]

Es ist zu beachten, dass dieses Modell den Fall einer Verbrennung außerhalb des Raumes (Flamme schlägt aus der Öffnung) nicht erfasst, und auch die Flammentemperatur selbst nicht bestimmt wird.

Jede der oben aufgeführten Größen in der Energiebilanz muss durch geeignete Submodelle berechnet werden. Dabei kann es sich um eine einzige Gleichung oder einen Satz von Gleichungen handeln. Aus dieser kurzen Charakterisierung wird bereits deutlich, dass die Vollbrandmodelle alle Elemente der Brandentwicklungsphase ausklammern. Sie sind also nur für Aufgabenstellungen geeignet, welche die Vollbrandphase betreffen. Grundsätzlich ist Vorsicht geboten bei der Extrapolation der Rechenergebnisse auf große Räume und bei Brandszenarien (z. B. bei geringer Brandbelastung), die eine gleichmäßige Erwärmung des Raumes nicht erwarten lassen.

5.3.4 Zonenmodelle

Mit zunehmendem Kenntnisstand der Brandforschung wurden die Beschränkungen der Vollbrandmodelle erkannt und die Entwicklung der Mehrzonenmodelle eingeleitet. Die Grundlage der Zonenmodelle basiert auf der Trennung zwischen einer wärmeren Rauchgasschicht und einer darunterliegenden kälteren Luftschicht, die rauchfrei oder raucharm ist. Diese Bedingungen finden sich hauptsächlich in der Pre-Flashover-Phase eines Brandes, bzw. bei Bränden mit einer gegenüber dem Brandraum begrenzten Ausdehnung. Als Konsequenz dieser Aufteilung in Zonen wird es notwendig, eine entsprechende Aufteilung der beschriebenen physikalischen Größen vorzunehmen, d. h. beispielsweise, dass zwischen der Temperatur der Rauchgasschicht und der Luftschicht unterschieden wird. Daraus wird ersichtlich, dass sich die Anzahl der Variablen deutlich erhöht. Darüber hinaus wird der Austausch von Masse komplexer, da nunmehr unterschiedliche Strömungen auftreten können. Dies ist eine Folge davon, dass die Lage der neutralen Ebene (Z_n) nicht mit der Lage der Rauchgasschicht (Z_s) übereinstimmen muss. Weiterhin ist der Austausch von Masse und Energie zwischen den Schichten zu

gasschichtung, dem Strahlungsaustausch zwischen unterschiedlichen Bereichen im Brandentwicklungsstadium, der Rückführung von Rauchgasen in die kühlere Luftschicht usw. realistischer zu beschreiben. Die Unterscheidung von mindestens zwei Zonen führt zu einer größeren Anzahl von Bereichen mit unterschiedlicher Temperatur und Emissivität. Die Berechnung des Strahlungsaustausches zwischen Flammen, Wänden und Objekten trägt wesentlich zu dem höheren Detaillierungsgrad der Mehrzonenmodelle bei.

Zwischen den Variablen bzw. thermodynamischen Größen, bestehen folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned}\rho_i &= \frac{m_i}{V_i} \\ E_i &= c_v \cdot m_i \cdot T_i \\ p &= R \cdot \rho_i \cdot T_i \\ V &= V_s + V_l\end{aligned}\tag{5.8}$$

mit

V_s	Volumen der Rauchgasschicht
V_l	Volumen der Luftschicht
E_i	innere Energie bei konstantem Volumen
p	Druck

Die genannten Erhaltungsgleichungen führen zusammen mit den Beziehungen der physikalischen Größen untereinander zu einem Satz gekoppelter Differentialgleichungen, die numerisch gelöst werden. Wie bereits geschildert, ist sowohl die Anzahl, als auch die Komplexität der benötigten Submodelle größer als bei Vollbrandmodellen.

Wie bei den Vollbrandmodellen kann die Wärmefreisetzungsrates als zeitlicher Verlauf vorgegeben werden. Allerdings wird die Flamme oder der Plume differenzierter behandelt, da hier eine Strahlungsquelle vorliegt, deren Energie nicht mehr nur einem Volumen zufließt, sondern zwei Schichten. Weiterhin werden neben dem Sauerstoff noch andere Spezies beschrieben. Es handelt sich beispielsweise um die bei der Verbrennung freiwerdenden gasförmigen Bestandteile wie CO_2 , CO und HCN oder die Rußpartikel, welche für die Sichteintrübung des Rauchgases verantwortlich sind. Zur Bilanzierung dieser Produkte ist ein weiterer Erhaltungssatz (Erhaltung der Spezies) und die Vorgabe der experimentell bestimmten Ausbeuten aus unterschiedlichen Brandstoffen (Yields) notwendig. Dies ist die einfachste Version eines Verbrennungsmodells. Einige Zonenmodelle verfügen darüber hinaus über die Möglichkeit der Vorhersage der Wärmefreisetzung oder der Abbrandrate in Abhängigkeit von den Bedingungen innerhalb des Brandraums. Es ist jedoch notwendig, darauf hinzuweisen, dass dies nur für wenige reine Brennstoffe und sehr einfache Brennstoffgeometrien möglich ist.

Ein wesentliches Submodell stellt der Plume-Massenstrom (siehe oben) dar, der beschreibt, wie viel Masse und Energie (konvektiv) der Rauchgasschicht zugeführt wird. In der Literatur werden eine Reihe unterschiedlicher Modellansätze beschrieben, die aber in den Zonenmo-

dellen teilweise durch zusätzliche Betrachtungen modifiziert werden. Im Allgemeinen sind daher die innerhalb der Modelle verwendeten Ansätze nicht völlig identisch mit den ursprünglichen Angaben.

Der Druckverlauf über der Raumhöhe ist zur Bestimmung der Austauschmassenströme notwendig.

Aufgrund der unterschiedlichen Schichten und der Lage der neutralen Ebene ist die Beschreibung des Massenaustauschs mit der Umgebung komplizierter als beim Vollbrandmodell. Die Grundlage bildet die Bernoulligleichung, allerdings sind Fallunterscheidungen bezüglich der Lage der neutralen Ebene zu treffen. In Abhängigkeit von deren Lage zur Rauchgasschicht erfolgt eine Zuordnung der Massenströme.

Bei Öffnungen in Decken oder Fußböden ist zusätzlich das Strömungsverhalten bei kleinen Druckunterschieden zu beachten, weshalb sich die diesbezüglichen Submodelle von denjenigen für Öffnungen in vertikalen Umfassungen unterscheiden.

Die Bilanzierung der Energieverluste erfolgt nach denselben Grundlagen wie beim Vollbrandmodell, jedoch sind die Verhältnisse aufgrund der unterschiedlichen Schichten auch hier komplexer. Neben der Berücksichtigung des Austausches von Strahlung der vorhandenen zeitabhängigen Schichten muss nunmehr auch die unterschiedliche Umgebungstemperatur der in den jeweiligen Schichten befindlichen Umfassungsbauteile Berücksichtigung finden. Ferner wird der Strahlungsanteil der Flamme berücksichtigt.

Der Wärmetransport durch die Umfassungsbauteile kann wiederum durch die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden.

Die bisher genannten Submodelle sind notwendige Bestandteile von Zonenmodellen. Darüber hinaus können, bzw. müssen, jedoch zusätzliche Berechnungen durchgeführt werden, um insbesondere lokale Temperaturen zu bestimmen.

Dazu gehören Plume-Temperaturen, d. h. die Temperaturwerte oberhalb der Flammen und Temperaturwerte im ceiling jet (siehe oben). Diese Ansätze können zur Berechnung von Bauteiltemperaturen oder zur Beschreibung des Auslöseverhaltens von Sprinklern Verwendung finden. Durch die Bilanzierung von Verbrennungsprodukten ist es möglich, mittlere Konzentrationswerte zu berechnen, die für weitere Beurteilungen (z. B. Erkennungsweite innerhalb der Rauchgase, s. Kap. 8) herangezogen werden können. Weiterhin verfügen die meisten Modelle über Ansätze zur Beschreibung einer mechanischen Ventilation.

Neben den genannten Submodellen existiert eine Reihe von Modellansätzen zur Beschreibung von Strömungsphänomenen. Beispiele dafür sind Strömungsformen, die zur Mischung zwischen Rauchgasschicht und Luftschicht beitragen. Die bisher vorliegenden Beziehungen zur Beschreibung dieser Sekundärströmungen sind jedoch nicht vollständig akzeptiert, bzw. nicht mit hinreichender Sicherheit verifiziert und daher wird i. A. auf ihren Einsatz verzichtet.

Auf weitere Details der zur Anwendung kommenden Submodelle und ihrer mathematischen Darstellung kann hier nicht eingegangen werden. Für eine Einführung in die Grundlagen der Zonenmodelle wird daher auf die Literatur verwiesen [5.1], [5.2], [5.3], [5.4], [5.5], [5.6].

Durch Einführung der Mehrraummodelle, mit denen sich der Massen- und Energieaustausch zwischen mehreren Räumen mit unterschiedlichen Ventilationsöffnungen berechnen lässt,

wuchsen auch die Anforderungen an die numerischen Methoden. Bei Simulationsrechnungen, die mehrere Räume umfassen, steigt nicht nur die Rechenzeit an, sondern auch die Möglichkeit, dass die Algorithmen nicht konvergieren. Deshalb wurden in den vergangenen Jahren die numerischen Methoden verbessert.

Die Mehrzonenmodelle sind international anerkannt als Hilfsmittel zur Beurteilung der sich bei unterschiedlichen Ventilationsverhältnissen und Brandentwicklungen einstellenden Rauchgasschicht [5.1], [5.3], [5.4], [5.5], [5.7], [5.8]. Diese ist für die Beurteilung der Möglichkeiten zur Flucht und Rettung von Personen aus dem Brandraum sowie zur Brandbekämpfung durch die Feuerwehr von entscheidender Bedeutung. Neben der mittleren Rauchgastemperatur können auch die Massenanteile von Brandprodukten abgeschätzt werden. Zu diesem Zweck müssen allerdings die Entstehungsraten bekannt sein.

5.3.4.1 Mehrraum-Mehrzonenmodelle

Die Kopplung zwischen den einzelnen Räumen (Segmenten) erfolgt hier dadurch, dass die Abflüsse von Masse und Energie aus den angekoppelten Räumen als Zuflüsse des aktuell betrachteten Raums wieder in die Bilanz eingehen. Die Verbindung zwischen den Brandrauchschichten und den kalten Luftschichten wird über Einmischströme und somit über die Bilanz des Plumes hergestellt.

Zur Lösung stehen für jede Schicht eine Massen- und eine Energiebilanz zur Verfügung. Das entstehende umfangreiche Gleichungssystem wird mit geeigneten numerischen Verfahren gelöst. Ausgehend von einem Startwert (alter Zustand) werden dabei die Unbekannten solange variiert, bis alle Gleichungen mit einer vorgegebenen Genauigkeit erfüllt sind.

Räume im Sinne des Rechenprogramms können sein:

- Brand- oder Rauchabschnitte,
- einzelne baulich ausgebildete Räume,
- Hallenbereiche oder Räume mit Unterteilungen durch Einbauten oder Teilabtrennungen.

5.3.4.2 Allgemeine Beurteilung von Zonenmodellen

Im Prinzip können neue Erkenntnisse relativ leicht in Zonenmodelle übertragen werden, entscheidend ist dabei, wie die zu Grunde liegende Physik in geeigneter Form in die Modellgleichungen eingeführt werden kann. Obwohl viele Ansätze existieren, können Phänomene wie Mischungsprozesse, Flammen aus Fenstern, transiente Korridorströmungen oder Strömungen in Schächten bisher nicht ausreichend genau beschrieben werden. Dies schränkt den Gebrauch von Zonenmodellen auf diesen speziellen Gebieten ein. Es hängt von der Fragestellung ab, ob Trendaussagen möglich sind.

Zonenmodelle können durchaus für größere Räume wie Atrien erfolgreich eingesetzt werden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass der Einsatz nicht bis zu beliebig großen Räumen sinnvoll ist, da die Grundvoraussetzung der zwei stabilen Schichten i. A. nicht mehr gegeben ist. Wie Experimente in großen Räumen bis 3.600 m² zeigen, kann sich hier durchaus eine stabile Schichtung ausbilden, Experimente bei noch größeren Flächen liegen bisher nicht vor. Bei Flächen in der genannten Größenordnung ist jedoch darauf zu achten, dass der Abstand

der Rauchgasgrenze zu den Zuluftöffnungen ausreichend groß ist, da mit abnehmender Rauchgastemperatur auch die Schichtungsstabilität abnimmt. Bis zum Vorliegen exakteren Begrenzungen kann man sich hier an den diesbezüglichen Anforderungen der DIN 18232-2 orientieren.

5.3.5 CFD-Modelle

Für die Feldmodelle hat sich auch im deutschsprachigen Raum der Begriff CFD-Modelle (aus dem englischen „Computational Fluid Dynamics“) durchgesetzt. Dabei ist dies zunächst eine allgemeine Bezeichnung für Verfahren, mit denen Probleme aus dem Bereich der Strömungsdynamik numerisch gelöst werden können. In dem hier benutzten engeren Sinn ist unter einem Feld- oder CFD-Modell ein Computerprogramm zu verstehen, welches hinsichtlich seiner physikalischen Teilmodelle sowie des gewählten numerischen Lösungsalgorithmus in der Lage ist, die speziell im Zusammenhang mit einem Brandereignis auftretenden Phänomene der Rauch- und Wärmeausbreitung angemessen zu beschreiben. Dabei ist der Einsatz von CFD-Modellen nicht notwendigerweise auf Brände in Gebäuden oder ähnlich umschlossenen Bereichen beschränkt. Vielmehr lassen sich mit dieser Methode auch Brände im Freien oder die Ausbreitung von Brandgasen aus einem Gebäude in die Umgebung rechnerisch simulieren.

Dabei basiert die Feldmodellierung auf einem fundamentalen Ansatz, welcher grundsätzliche physikalische Gesetzmäßigkeiten der Strömungs- und Thermodynamik berücksichtigt. Dadurch wird der Einfluss empirischer, durch Anpassung an experimentellen Daten festzulegender Modellparameter möglichst klein gehalten.

Ausgehend von den allgemeingültigen physikalischen Prinzipien der Erhaltung von Masse, Energie und Impuls werden in der Strömungsdynamik entsprechende Erhaltungsgleichungen abgeleitet, welche die zeitliche und räumliche Veränderung elementarer Größen wie z. B den Druck beschreiben, gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren wie Viskosität und Wärmeleitfähigkeit des Rauch-Luft-Gemischs. Im Einzelnen erhält man so Bestimmungsgleichungen für die Gesamtdichte und Einzelkomponenten des Gasgemisches, die Strömungsgeschwindigkeit, den Druck sowie die Temperatur.

Überblicke über Computerprogramme zur Simulation von Raumbränden inklusive CFD-Modellen, teilweise auch mit ausführlichen Informationen zu den physikalischen und mathematischen Hintergründen sowie mit praktischen Anwendungsbeispielen findet man z. B. in [5.5], [5.23] - [5.28].

Um die auftriebsgesteuerten Strömungen numerisch berechnen zu können, muss das Berechnungsgebiet zunächst räumlich und zeitlich diskretisiert werden und Randbedingungen festgelegt werden. Zur Begrenzung des Rechenaufwandes, bzw. um brandschutztechnisch relevante Strömungen überhaupt berechenbar zu machen, bedarf es darüber hinaus Submodelle zur Berücksichtigung von Turbulenzeffekten. Darüber hinaus bedarf es Submodelle um die verbrennungstechnischen Quellterme zu berücksichtigen. Dies sind insbesondere:

- Verbrennung,
- Strahlung,
- Rauchproduktion und

5 Modelle für die Brandsimulation

- Pyrolyse.

Nachfolgend werden die Modellierungsschritte und Submodelle für die Anwendung von CFD-Modellen grundlegend betrachtet. Weitergehende Erläuterungen können [5.91] und [5.92] entnommen werden.

5.3.5.1 Räumliche und zeitliche Diskretisierung

Da die lokalen hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen in allen Fällen von praktischem Interesse nicht direkt analytisch lösbar sind, werden sie numerisch behandelt. Dazu konstruiert man ein dreidimensionales Rechengitter, welches das betreffende Gebiet überdeckt. Dieses Gebiet besteht in der Regel aus dem Gebäude bzw. dem zu untersuchenden Brand- oder Rauchabschnitt sowie gegebenenfalls auch Bereichen außerhalb des Gebäudes, um auch die durch Öffnungen einströmenden Zuluft bzw. die ausströmenden heißen Rauchgase angemessen zu erfassen. Das Rechengitter besteht typischerweise aus mehreren hunderttausend bis zu einigen Millionen Zellen, die auch Kontrollvolumina genannt werden. Die Größe der Gitterzellen ist bei den meisten Rechenverfahren variabel, sodass das Gitter optimal an die räumlichen Gegebenheiten und die Problemstellung angepasst werden kann. Häufig werden rechtwinklige Gitterstrukturen (kartesisches Koordinatensystem mit den horizontalen Koordinaten x und y und der vertikalen Koordinate z) benutzt.

Die räumliche Struktur des Szenariums wird durch die Randbedingungen sowie durch die Einführung spezieller Bereiche des Rechengitters festgelegt, die entweder räumlich ausgedehnte Objekte oder grundsätzlich für die Gasströmung unzugängliche Bereiche repräsentieren. Sie beeinflussen die Lösung der Erhaltungsgleichungen durch die entsprechenden Randbedingungen.

Auch die Zeitvariable wird diskretisiert. D. h. es werden jeweils die Änderungen des Systemzustandes berechnet, die sich nach einem kleinen Zeitschritt (typischerweise Sekundenbruchteile) ergeben.

Bild 5.4 zeigt eine schematische – auf die auftriebsbehaftete Konvektionsströmung beschränkte – Darstellung der zwischen den Gitterzellen ablaufenden physikalischen Prozesse, beschrieben durch die hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen. Der Feldmodellansatz ist daher für detaillierte rechnerische Nachweise sowie für die Brandursachenermittlung [5.29] geeignet.

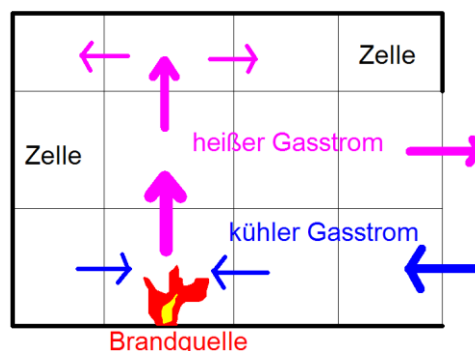


Bild 5.4 Schematische (zweidimensionale) Darstellung der zwischen den Zellen eines Rechengitters ablaufenden physikalischen Prozesse zum Austausch von Energie, Masse und Impuls.

Die im Bereich der Brandquelle erzeugten heißen Brandgase steigen unter dem Einfluss der Auftriebskraft nach oben, wobei Umgebungsluft eingemischt wird. Auf diese Weise bildet sich der Plume, ohne dass für die Modellierung zusätzliche Annahmen oder die Einführung weiterer Teilmodelle erforderlich sind. Die Struktur der Plume wird festgelegt durch die Stärke der Brandquelle, durch bauliche Randbedingungen und die Wechselwirkung mit Raum- oder Ventilationsströmungen. Erreicht der Plume den Deckenbereich, breitet sich dort eine radiale Gasströmung aus (ceiling jet). Jedoch lässt sich auch der Fall, dass die Thermik nicht ausreicht, um einen bis zur Decke reichenden Plume zu erzeugen, gleichermaßen mit dem Feldmodellansatz behandeln. Auch andere Effekte wie etwa das Absinken der sich abkühlenden Gase an den Umfassungswänden sowie die Bildung von Luftwirbeln und Rauchwalzen ergeben sich konsistent aus der Lösung der lokalen Erhaltungsgleichungen.

5.3.5.2 Randbedingungen

Die Lösung der hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen erfordert neben der Vorgabe eines geeigneten Anfangszustandes die Definition von Randbedingungen für die hydrodynamischen Variablen, entweder durch explizite Vorgabe oder durch Anwendung von physikalischen Modellen, die mit dem lokalen Feldmodellansatz verträglich sind.

Bei festen Randflächen (Umfassungsbauteile, Objekte oder blockierte Bereiche des Rechengitters) ist vor allem auf eine angemessene Behandlung des Wärmeübergangs zu achten. Unter bestimmten Voraussetzungen lassen sich dabei explizite Temperaturrandbedingungen einsetzen. Dazu gehört die sogenannte adiabatische Randbedingung, in denen die Temperatur am Rand derjenigen der benachbarten inneren Gitterzelle entspricht, sowie die isothermen Randbedingungen, bei denen die Temperatur am Rand auf einem festen Wert gehalten wird. Zwischen diesen beiden Grenzfällen kann auch interpoliert werden. Wesentlich aussagekräftigere Resultate erhält man jedoch, wenn die Temperaturrandbedingung auf der Berechnung des Wärmeübertrags durch Konvektion und Strahlung durch Lösung der zugehörigen zeitabhängigen Wärmeleitungsgleichung (Fouriergleichung) basiert.

Der Massenstrom an festen Grenzflächen ist Null. Gegebenenfalls sind zur Behandlung der Viskosität entsprechende Grenzschichtmodelle anzusetzen.

Freie Randflächen stellen eine künstliche Begrenzung des Simulationsgebietes dar, an welchen die lokalen Druck- und Temperaturwerte, Strömungsgeschwindigkeiten, Stoffkonzentrationen sowie gegebenenfalls weitere strömungsdynamische Variablen festzulegen sind. Man muss dabei unterscheiden zwischen freien Randbedingungen im eigentlichen Sinne und Randbedingungen für erzwungene Ventilation. In letzterem Fall sind entweder die Massenstromraten oder die Volumenstromraten als Funktion der Zeit explizit bekannt, sodass daraus die lokale Geschwindigkeit berechnet werden kann.

Üblicherweise beschreiben die freien Randbedingungen einen Abschluss des Simulationsgebietes in einiger Entfernung von der zu untersuchenden Struktur, der einen Übergang in die weitere, nicht mehr durch das Rechengitter erfasste Umgebung darstellt. Der für die Strömungsverhältnisse im Umfeld der Struktur relevante Bereich der Umgebung wird also direkt in die Simulation mit einbezogen. Ist der Abstand zum eigentlichen Brandgeschehen groß genug, ändert sich an den Randflächen die Strömungsgeschwindigkeit nur noch unwesentlich, sodass

in guter Näherung ein Gradient der Geschwindigkeit von Null an der freien Randfläche vorgegeben werden kann. Bild 5.5 verdeutlicht dies an einem Beispiel, welches die mit einem Feldmodell berechneten Strömungsvorgänge in einem Brandraum mit offener Tür in die Umgebung zeigt. Dargestellt ist ein Längsschnitt durch das dreidimensionale Szenario in Höhe der Tür des Brandraums.

Generell lassen sich freie Randbedingungen auch durch Vorgabe geeigneter spezieller Geschwindigkeits- oder Druckrandbedingungen festlegen (etwa auch zur Berücksichtigung des Windeinflusses), wobei der Gültigkeitsbereich solcher Vorgaben immer sorgfältig zu prüfen ist, da die Wahl der Randbedingungen einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben kann.

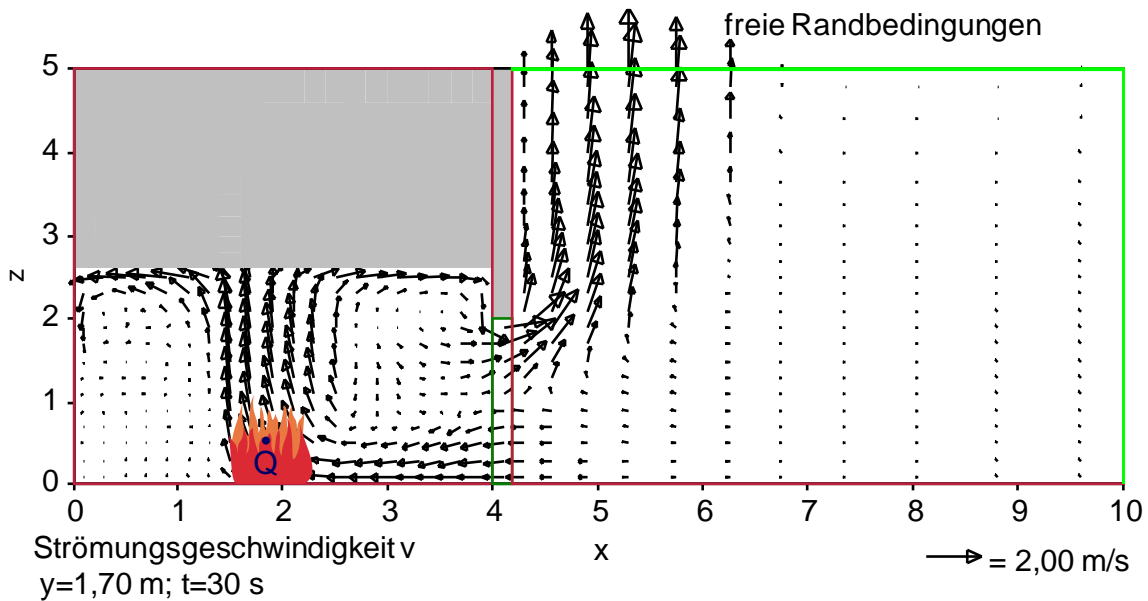


Bild 5.5 Schematisches Beispiel einer innerhalb des Rechengitters liegenden baulichen Öffnung (CFD-Simulation mit einem Feldmodell). Dargestellt ist ein Längsschnitt durch das dreidimensionale Szenario in Höhe der Tür des Brandraums

5.3.5.3 Turbulenzmodellierung

Mit zunehmender Reynoldszahl – einer dimensionslosen Kennzahl, die das Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskraft charakterisiert – geht eine Strömung vom laminaren in den turbulenten Zustand über. Dieser turbulente Strömungszustand ist charakteristischerweise instationär, unregelmäßig und im Allgemeinen dreidimensional. Ein besonderes Merkmal ist das Auftreten von Wirbeln, deren Größe über einen weiten Bereich schwanken kann und die Umwandlung von Energie in Wärme durch viskose Reibung. Nun gelten die hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen gleichermaßen sowohl für laminare als auch für turbulente Strömung, sodass im Prinzip eigentlich keine Notwendigkeit besteht, zusätzliche spezielle Verfahren zur Turbulenzmodellierung heranzuziehen. Allerdings ist die Größe der darstellbaren Wirbel in der Praxis durch die Auflösung des Rechengitters beschränkt. Zur Berücksichtigung der Effekte solcher nicht direkt auflösbaren Wirbel wurden verschiedene Verfahren (Turbulenzmodelle) entwickelt.

Bei der „Direkten Numerischen Simulation“ (DNS) wird kein Turbulenzmodell eingesetzt. Deshalb müssen im Prinzip die kleinsten Wirbel noch räumlich aufgelöst werden, was eine sehr feine Gitterstruktur erzwingt. Da dies die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Rechenleistung übersteigt bzw. zu extrem langen Rechenzeiten führt, versucht man diesen Ansatz näherungsweise mit größeren Gitterweiten umzusetzen.

Das k - ϵ -Turbulenzmodell beschreibt Turbulenzeffekte durch zwei zusätzliche Variablen in den hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen, indem gemittelte Strömungsgleichungen nach Mittelwerten der Strömungsgrößen gelöst werden. Weitere gebräuchliche Zweigleichungsmodelle sind bspw. das k - ω -Turbulenzmodell oder das k - ω -SST Turbulenzmodell. Solche statistischen Modelle lösen eine Sonderform der strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen, die sogenannten Reynolds Averaged Navier Stokes – Gleichungen (RANS).

Bei der „Large Eddy Simulation“ (LES) werden die für die Rauch- und Wärmeausbreitung relevanten Wirbel direkt aufgelöst (wie in der DNS) und die kleinskaligen Strukturen, für welche das Gitter zu grob ist, geeignet modelliert (Feinstrukturmodell). Da experimentelle Befunde zeigen, dass im Falle der Brandmodellierung die hinsichtlich ihres Energiegehaltes bedeutsamen Wirbel eine räumliche Ausdehnung haben, die der lokalen Plumbreite entspricht [5.30], [5.31], lassen sich diese Methoden mit den bei herkömmlicher verfügbarer Rechenleistung möglichen Gitterauflösungen auch für größere Räume einsetzen, sofern – wie hier vorausgesetzt – nicht der Verbrennungsprozess selbst modelliert werden soll.

Ein verhältnismäßig junge Möglichkeit der Turbulenzmodellierung ist die „Detached Eddy Simulation“. Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus RANS-Ansatz im Grenzbereich von Wänden und Decken und ein LES-Ansatz in vom Grenzbereich entfernteren Bereichen.

5.3.5.4 Verbrennungsmodellierung

Bei der dreidimensionalen CFD-Modellierung ist neben der (flächenspezifischen) Brandleistung und der Brandfläche (Brandausbreitungsgeschwindigkeit) ein weiterer Aspekt zu beachten: Die Wärmefreisetzung erfolgt in einem endlichen Raumvolumen, welches in geeigneter Form festgelegt werden muss. Dabei unterscheidet man drei prinzipiell unterschiedliche Vorgehensweisen

- Volumenquellen,
- Thermikstrahlen und
- Verbrennungsmodellierung.

Bei der Simulation von Bemessungsbränden, in denen die Brandleistung als Funktion der Zeit vorgegeben ist, liefern Volumenquellen und Verbrennungsmodellierung gleichwertige Resultate.

Volumenquellen

Bei Volumenquellen wird pro Zeiteinheit so viel Energie in einem bestimmten Volumenbereich freigesetzt, dass die durch den Bemessungsbrand vorgegebene (konvektive) Brandleistung (gesamte Wärmefreisetzung abzüglich Strahlungsanteil) erreicht wird - üblicherweise exakt für jeden Zeitpunkt (d.h. in jedem Zeitschritt der CFD-Simulation) oder zumindest im Mittel für kleine Zeitintervalle. Im einfachsten Fall ergibt sich das Volumen aus einem Bereich konstanter

Höhe über der Brandfläche, wobei die momentane Höhe sich gegebenenfalls im Laufe der Zeit (z. B. abhängig von der Wärmefreisetzungsrate) ändern kann. Dabei ist darauf zu achten, dass Größe des Volumens und Brandleistung - also die Energiedichte pro Zeiteinheit - physikalisch konsistent sind. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Temperatur im Bereich der Brandquelle mit Flammentemperaturen im Bereich von etwa 800 °C - 1300 °C deutlich über- oder unterschritten wird. Man kann eine typische Energiedichte pro Zeiteinheit innerhalb der Verbrennungszone (1,2 - 1,8 MW/m³) heranziehen, um damit die erforderliche Höhe der Volumenquelle festzulegen bzw. automatisch innerhalb des Brandmoduls eines CFD-Programms für jeden Zeitschritt berechnen zu lassen. Der konvektive Anteil der Energie sowie die durch Abbrandrate und Ausbeuten bestimmten Verbrennungsprodukte werden gleichförmig in allen Gitterzellen des so festgelegten Quellvolumens freigesetzt und durch die auftriebsbehaftete Konvektionsströmung räumlich verteilt, wodurch sich ohne die Notwendigkeit weiterer (empirisch abgeleiteter) Ansätze oder Vorgaben die von der jeweiligen Geometrie und den Ventilationsbedingungen abhängige Plumestruktur entwickelt.

Thermikstrahlen

Bei Thermikstrahlen wird ein heißes Gas (normalerweise Luft) mit einem bestimmten Volumen- bzw. Massenstrom im Bereich der Brandquelle zugeführt. Um die thermischen und geometrischen Strahlparameter in Abhängigkeit von der gewünschten Wärmefreisetzungsrate bzw. festzulegen, ist die Anwendung eines empirischen Modells (Plumemodell) notwendig, was normalerweise nicht mit dem fundamentalen Ansatz der CFD-Modellierung im Einklang steht. Thermikstrahlen werden daher eher bei der physikalischen Modellierung eingesetzt, sie sind für die Berechnung mit Brandsimulationsmodellen nicht typisch.

Verbrennungsmodellierung

Neben den oben beschriebenen vereinfachten Ansätzen besteht auch die Möglichkeit die Verbrennungsreaktion selbst zu modellieren. Ein Vorteil der Verbrennungsmodellierung besteht darin, dass das Eintreten unterventilierter Brandverhältnisse berücksichtigt werden kann. Ist im Brandraum weniger Sauerstoff vorhanden, als für die Freisetzung der zugrunde gelegten Wärmefreisetzungsrate benötigt wird, wird nur so viel Wärme freigesetzt, wie anhand der Verbrennungsreaktion und der Sauerstoffkonzentration möglich ist. Hierdurch können sich ggf. Abweichungen zwischen der berechneten und der zugrunde gelegten Wärmefreisetzungsrate ergeben.

Bei der Verbrennungsmodellierung ist grundsätzlich zwischen folgenden Ansätzen zu unterscheiden:

- der Ansatz einer unendlich schnelle Reaktionsgeschwindigkeit und
- der Ansatz endlicher Reaktionsgeschwindigkeiten.

Beim Ansatz der unendlichen schnellen Reaktionsgeschwindigkeit wird vereinfachend angenommen, dass der Brennstoff sofort mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft reagiert. Die durch die Verbrennung freigesetzte Energie ist somit abhängig von der Mischung von Brennstoff und Sauerstoff. Die Verbrennungsgeschwindigkeit v lässt sich dann anhand der zeitlichen Änderung der Konzentration des Brenn- und Sauerstoffes innerhalb des Kontrollvolumens beschreiben:

$$v = -\frac{dB}{dt} = -\frac{dS}{dt} = k \cdot B \cdot S \quad (5.9)$$

Die Faktoren B und S beschreiben den molekularen Anteil des Brennstoffes und des Sauerstoffes im betrachteten Kontrollvolumen. Bei einer unendlichen Reaktionsgeschwindigkeit gilt für die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante $k = 1$. Der Ansatz einer unendlich schnellen Reaktionsgeschwindigkeit kann bei Fragestellungen im Bereich des Brandschutzingenieurwesens mit guter Näherung angewendet werden, da die Verbrennung durch die Vermischung von Brennstoff und Sauerstoff zu einem zündfähigen Gemisch gesteuert wird, d. h. die eigentliche Verbrennungsreaktion verläuft deutlich schneller als das Mischen von Brennstoff und Sauerstoff. Bei niederenergetischen Bränden mit geringer freigesetzter Wärme und niedrigen Temperaturen, bspw. Glimm- und Schwelbränden, ist die Vermischung von Brennstoff und Sauerstoff schneller als die eigentliche Verbrennungsreaktion. In diesem Fall führt der Ansatz einer unendlich schnellen Reaktionsgeschwindigkeit zu einer zu hohen Wärmefreisetzung.

Beim Ansatz einer endlichen Reaktionsgeschwindigkeit hingegen ist die Verbrennungsreaktion nicht allein abhängig von der Konzentration von Brennstoff und Sauerstoff, sondern auch von der vorherrschenden Temperatur. Die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante oder Reaktionsrate lässt sich dann als Arrhenius-Funktion beschreiben (vgl. Pyrolysereaktion(5.2)):

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \cdot B^a \cdot S^b \quad (5.10)$$

mit

A	pre-exponentieller Faktor [-]
T	Temperatur [K]
E_a	Aktivierungsenergie [J/mol]
R	universelle Gaskonstante [8,314 J/(K·mol)]

Die Exponenten a und b sind materialabhängige Kennwerte und können experimentell bestimmt werden. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit ist es notwendig, die Temperaturberechnung möglichst genau abzubilden, woraus ggf. eine sehr geringe räumliche Diskretisierung resultiert.

Wie Anhand von Gleichung (5.9) und Gleichung (5.10) ersichtlich, wird für die Modellierung der Verbrennung die Konzentration von Brennstoff und Sauerstoff benötigt. Daher muss bei der Modellierung des Strömungsfeldes nicht nur die Massentransportgleichung für die gesamte Zelle berechnet werden, sondern auch die Massentransporte der einzelnen Spezies Brennstoff, Sauerstoff und Reaktionsprodukte.

Aus der Frage, mit welcher Reaktionsgeschwindigkeit die Verbrennung modelliert wird, ergibt sich die Frage, wie die Verbrennung innerhalb des Kontrollvolumen modelliert wird. Innerhalb eines Kontrollvolumens von 5 cm x 5 cm x 5 cm können Brennstoff, Sauerstoff und Reaktionsprodukt sowohl in gemischter, als auch ungemischter Form vorliegen. Daher werden für die Verteilung von Brennstoff, Sauerstoff und Reaktionsprodukt Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen angewendet.

Unter Ansatz einer unendlich schnellen Reaktionsgeschwindigkeit kann die Verbrennung direkt mit dem Burke-Schumann-Modell („mixed-is-burnt“) modelliert werden (siehe Bild 5.6). Aus dem gemittelten Mischungsverhältnis innerhalb des Kontrollvolumens werden die Reaktionsprodukte bestimmt.

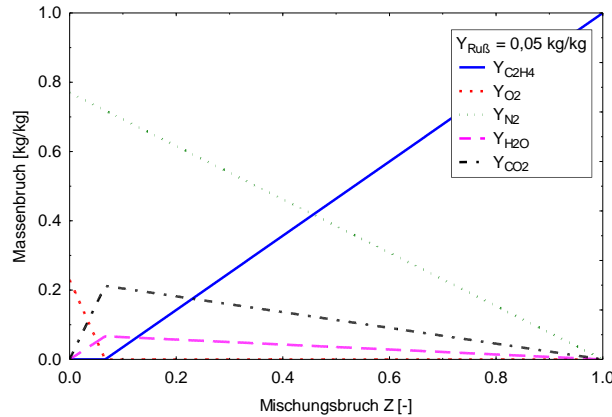


Bild 5.6 Massenanteile (Massenbruch) für Brennstoff $Y_{C_2H_4}$, Sauerstoff Y_{O_2} , (inertes Anteil) Stickstoff Y_{N_2} und Reaktionsprodukte Y_{H_2O} und Y_{CO_2} in Abhängigkeit vom Mischungsbruch Z für unendlich schnelle Verbrennung am Beispiel von Ethen

Aus der Mittelung des Mischungsverhältnisses ergibt sich, dass bei einer feinen räumlichen Diskretisierung die Verbrennungsreaktion besser abgebildet werden können.

Bei Ansatz einer endlichen Reaktionsgeschwindigkeit muss jedoch unterschieden werden, welche Zeitskala der Mischzeit t_t für die Verbrennungsreaktion maßgebend ist:

- die Reaktionszeit,
- Mischzeit aufgrund von molekularer Diffusion,
- Mischzeit aufgrund der auftriebsgesteuerten Strömungen,
- Mischzeit aufgrund der Subgrid-Turbulenz oder
- Mischung aufgrund großskaliger Turbulenz.

Ein Verbrennungsmodell, das dieses berücksichtigt, ist das Eddy-Dissipation-Modell. In diesem Modell wird die pro Sekunde und Kubimeter verbrennende Masse berechnet mit:

$$\dot{m}'''_{Br} = -C_R \cdot \bar{\rho} \cdot \frac{1}{t_t} \cdot \min\left(\tilde{B}; \frac{\tilde{S}}{s}; \frac{\tilde{P}}{1+s}\right) \quad (5.11)$$

mit

- C_R Modellparameter abhängig von Mischzeit, kinetischer Viskosität und turbulent kinetischer Energie,
- $\bar{\rho}$ Dichte,
- t_t Mischzeit,
- \tilde{B} gemittelter molekularer Anteil des Brennstoffs,
- \tilde{S} gemittelter molekularer Anteil des Sauerstoffs,

- \tilde{P} gemittelter molekularer Anteil des Reaktionsprodukts,
 s stöchiometrischer Koeffizient.

Das Eddy-Dissipation-Modell kann auch zur Verbrennungsmodellierung unter Ansatz einer unendlich schnellen Reaktionsgeschwindigkeit genutzt werden. In diesem Fall bleibt die Zeitskala für die Reaktionszeit unberücksichtigt und es besteht der Vorteil, dass für die Vermischung innerhalb des Kontrollvolumens das Turbulenzmodell angewendet wird, was sich positiv auf die erforderliche räumliche Diskretisierung auswirkt.

5.3.5.5 Modellierung der Strahlung

Neben der Wärmeübertragung durch Konvektion, die durch die Lösung der strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen berechnet werden kann, ist die Wärmeübertragung durch Strahlung bei der Modellierung von Bränden ein wesentlicher Faktor. Die Strahlungsleistung eines Schwarzen Strahlers P ermittelt sich anhand des Stefan-Boltzmann-Gesetzes:

$$P = \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4 \quad (5.12)$$

mit

- σ Stefan-Boltzmann-Konstante [W/(m²K⁴)],
 A Oberfläche [m²],
 ΔT Temperaturdifferenz [K].

Wie anhand von Gleichung (5.12) ersichtlich ist, ist der durch Strahlung übertragene Wärmestrom proportional zur Temperaturdifferenz vierter Potenz, weswegen bei steigenden Temperaturen im Brandraum die Strahlung zunehmenden Einfluss auf die Wärmeübertragung auf angrenzende Bauteile hat.

Bei der Wärmeübertragung durch Strahlung ist zu berücksichtigen, dass die Strahlung im Brandraum an den Oberflächen emittiert und absorbiert wird und darüber hinaus innerhalb des Raumes im vorherrschenden Gasgemisch (Sauerstoff, Stickstoff, Brennstoff, Verbrennungsprodukte et. alt.) emittiert, absorbiert und gestreut wird. Die Wärmeübertragung durch Strahlung kann durch die Strahlungstransportgleichung beschrieben werden:

$$s \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = \underbrace{-\kappa(x, \lambda) I_\lambda(x, s)}_{\text{Absorptionsverlust}} - \underbrace{\sigma_s(x, \lambda) I_\lambda(x, s)}_{\text{Streuungsverlust}} + \underbrace{B(x, \lambda)}_{\text{Strahlungsquellterm}} + \underbrace{\frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s', s) I_\lambda(x, s') ds'}_{\text{einfallende gestreute Strahlung}} \quad (5.13)$$

mit

- I_λ Strahlungsintensität,
 $\kappa(x, \lambda)$ Absorptionskoeffizient,
 $\sigma_s(x, \lambda)$ Streukoeffizient,
 $B(x, \lambda)$ Strahlungsquellterm.

Da die Strahlungstransportgleichung sowohl von der Wellenlänge der Strahlung λ , als auch vom Richtungsvektor der Intensität s abhängig ist, lässt sie sich für die Anwendung zur Simulationen von Bränden nicht mit einem vertretbaren Berechnungsaufwand lösen. Daher wird die Strahlungstransportgleichung durch unterschiedliche Annahmen für die Zusammensetzung des Gasgemisches und für das betrachtete Spektrum vereinfacht. Zu diesen Annahmen zählen:

- Annahme eines grauen Gases (gray gas model),
- Schmalband-Modelle (narrow-band model) und
- Weitband-Modelle (wide band model).

Zur Lösung der Strahlungstransportgleichung muss das Berechnungsgebiet zunächst räumlich durch die Unterteilung mittels Raumwinkel diskretisiert werden. Für die numerische Lösung der Strahlungstransportgleichung steht eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen:

- statischen Methoden,
- Zonen-Methoden und
- differentielle Methoden.

Ein Überblick über die verschiedenen Methoden kann [5.92] und [5.93] entnommen werden. Zu den bekannteren Methoden zählen:

- Monte-Carlo-Methode,
- Diskrete-Transfer-Methode,
- Finite-Volumen-Methode und
- das P-1 Strahlungsmodell.

5.4 Validierung und Verifikation mathematischer Modelle

5.4.1 Allgemeines

Aufgrund der Bedeutung der zur Anwendung kommenden Nachweisverfahren (Handrechnungen, Computersimulationen, experimentelle Modelle) ist eine Qualitätskontrolle unumgänglich. Neben einer Plausibilitätsbetrachtung der jeweiligen Ergebnisse ist dabei auch die Bewertung (Validierung) der benutzten Verfahren notwendig. Diese Bewertungen sind am besten mit Experimenten verschiedener Art und Größe durchzuführen. Verifikationen an analytischen Lösungen sind im Rahmen der Entwicklung eines Verfahrens oder Modells wichtig, um die grundsätzliche Übereinstimmung mit der Physik zu demonstrieren. Solche Überlegungen wurden bereits auf anderen Gebieten angestellt und sind auch für die Simulationsverfahren im Brandschutz gültig [5.88], [5.89]. Die Bewertung der Programme erfolgt dabei methodisch durch drei Schritte, die hier gemäß den Angaben [5.89] nochmals genauer beleuchtet werden:

- Modellqualifizierung,
- Modellverifizierung und

- Modellvalidierung.

Ein Modell ist qualifiziert, wenn die für die Beschreibung der realen Fragestellung notwendigen Phänomene im Modell ausreichend berücksichtigt sind. Dies bedeutet nichts anderes, als dass eine Größe, welche als Ergebnis verwendet werden soll, auch durch das Modell in geeigneter Form und nachvollziehbar berechnet werden muss. Die Klärung der Qualifikation unter dem Aspekt der Anwendung bei praktischen Fragestellungen setzt somit zwei Dinge voraus nämlich, dass die physikalischen und mathematischen Grundlagen des Modells hinreichend dokumentiert sind und dass der Anwender in der Lage ist zu entscheiden, ob die dargestellten Modelleigenschaften zur Beantwortung der jeweiligen Fragestellung ausreichen.

Die Modellverifizierung kann sich entsprechend der Begriffsgrundlage nur auf relativ exakt überprüfbare Vorgänge beschränken. Sie beinhaltet daher im Wesentlichen Vergleiche mit exakten Lösungen für spezifische Randbedingungen oder besonders qualifizierten numerischen Lösungen. Dabei stehen sowohl die mathematisch-physikalischen, als auch die numerischen Verfahren auf dem Prüfstand. Hierbei wird insbesondere auch das korrekte Zusammenspiel der einzelnen Programmkomponenten überprüft. Auf diese Weise sollen Fehlerquellen, die sich auf dieser Ebene der Programmgestaltung einschleichen können, entdeckt und beseitigt werden. Die Verifizierung kann vom Anwender i. a. nicht geleistet werden. Hier ist es von Vorteil, wenn dies vom Programmentwickler oder von einem national oder international organisierten Anwenderkreis durchgeführt wird. Modelle, die einen solchen Prozess durchlaufen haben, sind vertrauenswürdiger als andere Modelle.

Die Modellvalidierung beinhaltet den Vergleich mit Experimenten und stellt einen fortwährenden Prozess dar, bei dem man sich der Anwendbarkeit auf unterschiedliche Problemstellungen vergewissert oder Fehlerbandbreiten und Schwachstellen bei der Anwendung erfasst. Für die Anwendung von Modellen ist grundsätzlich die vorgestellte Methodik anzuwenden, d. h. der Anwender hat zu prüfen, ob die verfügbaren Handbücher des jeweiligen Modells eine ausreichende Beschreibung der Modelleigenschaften beinhalten. Wie bereits geschildert, ist es günstig, wenn das Modell bereits durch einen großen Anwenderkreis genutzt wird und diesbezüglich Veröffentlichungen vorliegen, in welchen die obengenannten Themen aufgegriffen werden.

Für eine erfolgreiche Validierung sind als grundlegende Voraussetzungen die Beschreibung der physikalischen und methodischen Grundlagen des Nachweisverfahrens, eine genaue Dokumentation und Beschreibung der Brandversuche sowie vertiefte Kenntnisse über Modellierungsverfahren und Versuchsmesstechnik. Dabei ist die folgende Methodik anzuwenden:

- Auswahl und Sammlung von Experimentaldaten,
- Überprüfung der Experimentaldaten auf Plausibilität und Vollständigkeit,
- Modellierung des Szenarios für das entsprechende Rechenmodell,
- Ausführung von Simulationsrechnungen,
- Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Experiment,
- Bewertung des Vergleichs, ggf. qualitativ und quantitativ (numerische Abweichung).

Häufig liegen für eine vollständige Validierung nicht alle notwendigen Werte vor. Gerade bei den Quelltermen, d. h. bei den Abbrandraten, sind die Angaben in der Regel für eine Simulationvorgabe nicht ausreichend. Auch die Randbedingungen der Versuche erlauben oftmals keine absolut vollständige Modellierung. Liegen somit unbestimmte Randbedingungen und Quelldaten vor, dann kann die Modellierung eines Versuches unter Einsatz einer Parameterstudie durchgeführt werden, wobei die unbekanntes bzw. unsicheren Randbedingungen zu variieren sind.

Die Modellierung sollte dem realen Szenario bezüglich Geometrie und den Dimensionen weitestgehend entsprechen. Besondere Beachtung erfordert hierbei die Lage des Brandherdes, die Art der Ventilation sowie der Wandaufbau.

Die Quellterme stellen im Regelfall die größten Anforderungen an den Modellierer. Liegen nur ungenaue Angaben über die Wärmefreisetzung aus den Experimenten vor (vor allen in Experimenten von Bränden mit Mischbrandlasten), dann sind die Versuchsdaten u. U. durch bekannte Zusammenhänge zu ergänzen (z. B. hinsichtlich flächenspezifischer Wärmefreisetzungsrates oder Abbrandrates).

Ebenfalls zu beachten sind etwaige thermodynamische Daten (wie z. B. Emissionsgrade, Wärmeübergangswerte), die im Programm fest vorgegeben sind oder als Defaultwerte bei der Datensatzerstellung übernommen werden.

Dem Vergleich von Ergebnissen und Experiment kann eine Prüfung auf Plausibilität der Rechenergebnisse vorausgehen, im Allgemeinen erübrigt sich aber dieser Schritt wegen des unmittelbaren Vergleichs der errechneten Daten mit den experimentellen Daten. Je mehr Werte unmittelbar verglichen werden können, umso besser kann die Validierung durchgeführt werden. Folgende Größen eignen sich für einen Vergleich, wenn entsprechende Versuchsdaten vorliegen:

- Temperaturen,
- Rauchgasschichtdicke oder Rußkonzentrationsfeld,
- Rauchgaszusammensetzung,
- Massenströme und Geschwindigkeitsfelder,
- Druckverteilungen,
- Wandtemperaturen.

Besonderes Augenmerk ist hier auf die Gegenüberstellung vergleichbarer Mess- und Simulationsergebnisse (in Hinblick auf die geometrische Lage der Messstelle bzw. des Rechenwertes) zu legen. Als Beispiel sei hier der Vergleich einer Heißgastemperatur in Zonenmodellen und einer Messstelle im Versuch angeführt. Die errechnete Heißgastemperatur des Zonenmodells entspricht einer mittleren Gasschichttemperatur, während das Messergebnis je nach Art des Sensors einen lokalen Wärmeübergang in den Temperaturfühler durch Konvektion- und Strahlungsenergie an einem Raumpunkt wiedergibt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen eines Zonenmodells kann dann schwierig werden, wenn die Messwerte die Bestimmung eines Temperaturmittelwerts nicht zulassen. Aber auch der Vergleich von Rechenergebnissen eines Feldmodells mit denjenigen eines Experiments setzt eine gewisse Dichte von Messpunkten

voraus, da ggf. auftretende Abweichungen im Zahlenwert auch durch räumliche oder zeitliche Verschiebungen hervorgerufen werden können.

Die Ergebnisse sind auch hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklungen zu untersuchen, d. h. Änderungen im zeitlichen Ablauf müssen sich auch in entsprechenden Änderungen der jeweiligen Werte für die einzelnen Größen widerspiegeln.

Wenn möglich, sollte die Validierung nicht allein auf den Vergleich einer einzelnen Größe (z. B. der Temperatur) gestützt werden. Es muss immer das Gesamtsystem der Ergebnisse von Experiment und Simulation bewertet und berücksichtigt werden.

5.4.2 Bewertung der Prognosefähigkeit

5.4.2.1 Allgemeines

Für die Validierung von Modellen beschreiben Peacock et al. [5.77] grundlegende Techniken zum Vergleich zweier Zeitreihen. Hierbei werden diese als Vektoren interpretiert und die Elemente der Vektoranalyse, wie Norm und inneres Produkt, zur Beschreibung der Abweichung der Zeitreihen zueinander herangezogen. Diese Ansätze finden sich direkt in entsprechenden Normen wie z.B. ISO/FDIS 16730 [5.78] wieder. Weitere internationale Ansätze findet man z.B. in der ASTM E1355 [5.79].

5.4.2.2 Charakteristische Unsicherheiten

Ansätze zur Bewertung der Prognosefähigkeit von Modellen werden in Veröffentlichungen der US NRC gemacht. In [5.82] wird im Rahmen der Validierung internationaler Referenzaufgaben (Benchmark Exercises) auf Grundlage der Vorgehensweise der ASTM 1355 [5.79] ein Verfahren zur Bewertbarkeit der Prognosefähigkeit beschrieben. Der wesentliche Ansatz zur Bewertbarkeit liegt darin Unsicherheiten \tilde{U}_M , die sich bei der Simulation einer Größe ergeben, den Unsicherheiten \tilde{U}_E gegenüber zu stellen, die sich bei der experimentellen Ermittlung der Größe ergeben. Die Idee ist in Bild 5.7 dargestellt.

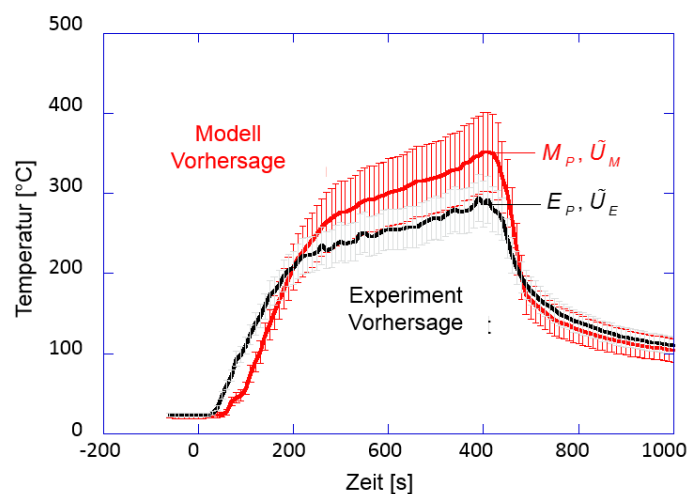


Bild 5.7: Peakwerte (M_P und E_P) und Unsicherheiten (\tilde{U}_M und \tilde{U}_E) bei Größen bei der Berechnung durch ein Modell (M) und bei der Ermittlung durch ein Experiment (E) [5.82]

Tabelle 5.1 Weighted Combined Expanded Uncertainty, U_{CW}

Messgröße	Anzahl der zu Grunde gelegten Versuche	U_{CW} (%)
Heißgasschicht Offset Temperatur	26	14
Heißgasschicht Dicke	26	13
Temperatur Ceiling Jet	18	16
Plume Temperatur Plume	6	14
Gas Konzentration	16	9
Smoke Konzentration	15	33
Druck	15	40 (keine mech. Ventilation) 80 (mechanische Ventilation)
Wärmestromdichte	17	20
Temperatur Oberfläche	17	14

Die Unsicherheiten sind abhängig vom verwendeten Modell und dem zu Grunde gelegten Experiment, so dass eine verallgemeinerte Darstellung nicht gegeben ist. Kombinierte und erweiterte Unsicherheiten sind dann mit $U_C \approx (\tilde{U}_M^2 + \tilde{U}_E^2)^{1/2}$ gegeben. Ein weiterer Schritt ist es, Unsicherheiten auf Grundlage mehrerer Tests zusammenzufassen. Die hieraus abgeleitete gewichtete, kombinierte und erweiterte Unsicherheit (Weighted Combined Expanded Uncertainty) U_{CW} stellt dann die für die weitere Bewertung zu Grunde gelegte repräsentative Unsicherheit dar. In Tabelle 5.1 ist eine Zusammenstellung der Werte nach der amerikanischen Studie [5.82] gegeben.

Die Ergebnisse der Studie für den berechneten und den gemessenen Temperaturanstieg in der Heißgasschicht (HGL) werden zusammenfassend in Bild 5.8 dargestellt. In der Darstellung werden die Ergebnisse getrennt nach den eingesetzten Modellen unterschieden. Die Untersuchungen wurden mit Plumegleichungen (Hand Calculation Methods), Zonenmodellen (Zone Model) und einem CFD Modell (CFD Model) durchgeführt. Gut erkennbar ist, dass die Berechnungen aus Plumegleichungen weit auf der sicheren Seite liegen, d. h. die berechneten Temperaturanstiege der Heißgasschicht liegen über den Werten aus den Experimenten.

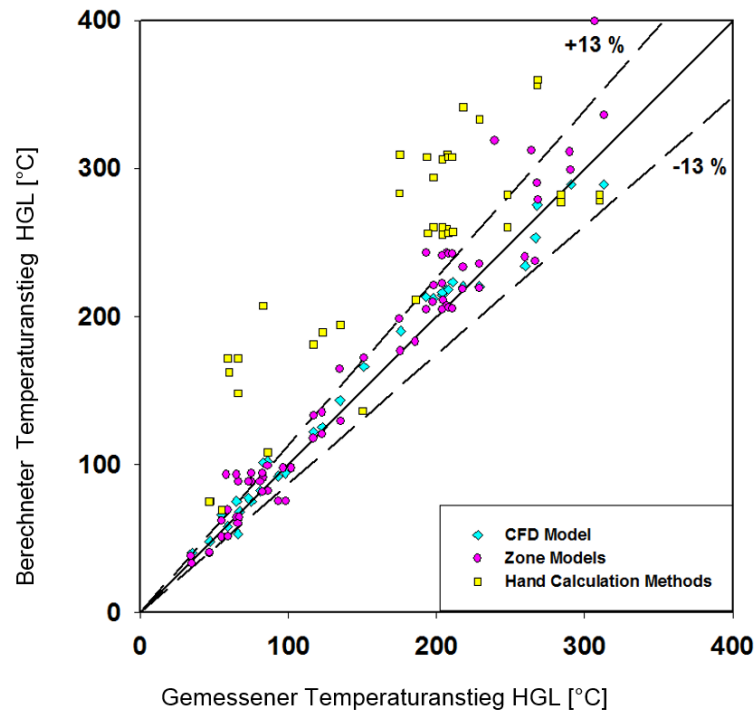


Bild 5.8 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit verschiedenen Modellansätzen berechneter und experimentell ermittelter Temperaturanstiege der Heißgasschicht (HGL), [5.82]

Für das international häufig eingesetzte Feldmodell Fire Dynamics Simulator (FDS) werden die Ergebnisse einer umfangreichen Validierung auf Grundlage des Vergleichs der Extrema für verschiedene Referenzaufgaben in [5.82] zusammengefasst.

5.4.2.3 Methodik zur Analyse der Zeitreihen aus Versuchen und Simulation

Im Rahmen der Validierungsrechnungen zur Untersuchung der Ergebnisse des internationalen Forschungsvorhabens PRISME [5.80] und [5.81] wird eine Methodik zur Analyse der Zeitreihen aus Versuch und Simulation beschrieben [5.83]. Die Methodik gliedert sich in zwei Teile. Einerseits wird ein lokaler Größenvergleich PEAK der Maxima bzw. Minima (Peaks) durchgeführt (5.14):

$$\text{PEAK} = \frac{\text{peak}Y_{\text{Simulation}} - \text{peak}Y_{\text{Versuch}}}{\text{peak}Y_{\text{Versuch}}} \quad (5.14)$$

Diese Methode ermöglicht eine sehr schnelle und einfache Beurteilung der Abweichung – in den Extremwerten – der Zeitreihen und deckt grobe Unstimmigkeiten auf. Sie erlaubt aber keine Aussage über das Verhalten der Zeitreihen während ihres gesamten zeitlichen Verlaufs zueinander.

Folglich wird andererseits ergänzend eine bezogene Fehlerquadratsumme NED (\triangleq „normalisierte euklidische Distanz“) (5.15) verwendet, die Peacock in [5.77] dokumentiert hat (n = Anzahl der Messpunkte):

$$\text{NED} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{Versuch},i} - Y_{\text{Simulation},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{Versuch},i})^2}} \quad (5.15)$$

Die hier verwendete Beziehung nach Peacock stellt ein Maß für die Abweichung in der Form bzw. während des gesamten zeitlichen Verlaufs der Zeitreihen dar.

Die Quadratur der Abweichungen an den einzelnen Messpunkten gewährleistet, dass sich positive und negative Abweichungen nicht gegenseitig kompensieren können. Der Bezug auf die Versuchswerte erlaubt andererseits eine direkte Beurteilung der Abweichung zweier oder mehrerer Zeitreihen zu den Versuchsergebnissen. Durch den Bezug auf die Versuchswerte als Basisgrößen wird dieser Konflikt vermieden. Dies lässt sich auch gleichermaßen auf die Bewertung unterschiedlicher physikalischer Größen miteinander übertragen.

Um Zeitreihen in Form von Gleichung (5.15) auswerten zu können, müssen für beide Reihen die gleiche Anzahl an Werten vorliegen und diese Werte müssen dem gleichen Zeitpunkt entsprechen. Da normalerweise die experimentellen und die numerischen Werte nicht im gleichen Zeitschritt Δt ermittelt wurden, ist es notwendig die Zeitreihen einem geeigneten Mittelungsverfahren zu unterziehen.

Nach Einführung von Grenzwerten, in die auch Überlegungen zu Ungenauigkeiten und Abweichungen bei der Messung einfließen müssen, ist in einem nachfolgenden Schritt eine abschließende, quantitative Bewertung der Simulationsergebnisse durchführbar. Mit Hilfe der oben beschriebenen Werte quantifiziert die Methode die Übereinstimmung bzw. Abweichungen von Zeitreihen. Sie ist dabei nicht auf das Brandschutzingenieurwesen beschränkt.

Um sowohl lokale als auch globale Effekte in Form von Bewertungszahlen darzustellen, wird häufig eine kombinierte Darstellung aus PEAK und NED, in Form eines X-Y Plots genutzt. Hierbei ist unter anderem die Berücksichtigung von Bewertungsgrenzkriterien eine sinnvolle Ergänzung bei der Darstellung. Bild 5.9 zeigt Ergebnisse am Beispiel für eine Untersuchung der Prognosefähigkeit der Temperatur (TG) und des Bewertungskriteriums „Erweiterte Unsicherheit“ $U_{cw} = 15\%$.

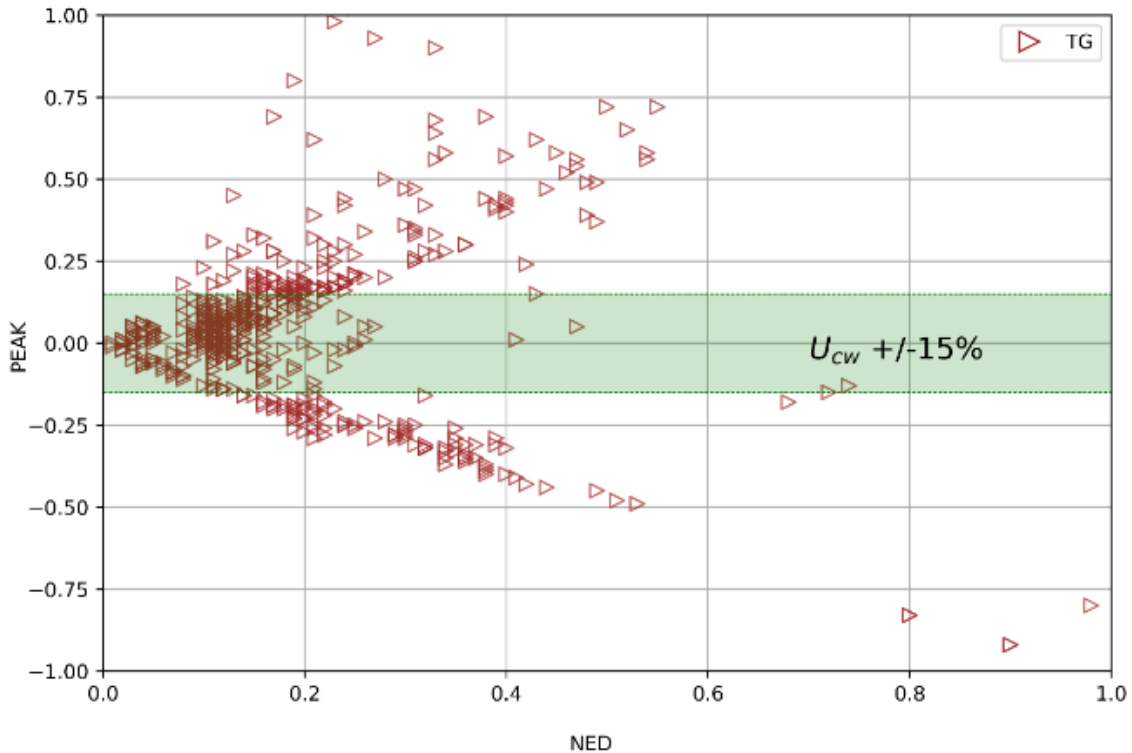


Bild 5.9 PEAK-NED Plot für Temperaturen der Gasphase (TG) unter Berücksichtigung des Bewertungsgrenzkriteriums U_{cw}

5.4.3 Continuous Integration

5.4.3.1 Allgemeines

Im Hinblick auf ein nachhaltiges Qualitätsmanagement gewinnen Techniken der Continuous Integration (CI) beim Design neuer Softwareprodukte zunehmend an Bedeutung. Dies betrifft insbesondere die Entwicklung großer, heterogener Simulationstools, die die Interaktion unterschiedlichster physikalischer und chemischer Phänomene abbilden sollen [5.90].

Vor diesem Hintergrund stellt vor allem die Simulation komplexer Brandszenarien eine ausgesprochen große Herausforderung dar, da sie gleichermaßen Prozesse der Strömungs- und Strukturmechanik, der Wärmestrahlung, Verbrennung und Pyrolyse bei gleichzeitiger Berücksichtigung unterschiedlichster räumlicher Skalen und komplexer Materialeigenschaften miteinander koppelt. Nicht zuletzt muss auch die effiziente Ausführbarkeit des Simulationscodes auf massiv-parallelen Hochleistungscomputern gewährleistet werden.

Ein wesentlicher Baustein des CI-Prozesses ist die Verwendung aussagekräftiger Performance- und Genauigkeitsmetriken zur systematischen Messung der statistischen Modellunsicherheiten. Deren Ergebnisse ermöglichen den Abgleich mit zuvor definierten Mindestqualitätsanforderungen und offenbaren Mängel bereits in einem frühen Entwicklungsstadium. Alle Projektbeteiligten werden dadurch in die Lage versetzt, in eine zielführende und konstruktive Kommunikation untereinander zu treten, frühzeitig Probleme beseitigen zu können und gemeinsam zu einer objektiven Bewertung des aktuellen Projektzustands zu gelangen.

5.4.3.2 Continuous Integration am Beispiel FDS

Die Entwicklung des Fire Dynamics Simulators (FDS) ist in ein übergreifendes CI-Framework eingebunden, das eine wichtige und eigenständige Komponente innerhalb des Gesamtentwicklungsprozesses darstellt. Unter dem Dach einer fortlaufenden Versionskontrolle wird der FDS-Quellcode mitsamt aller zugehörigen Daten (Dokumentation, V&V-Datenbank, Wiki, Visualisierungstools, etc.) auf einem frei zugänglichen Server bereitgestellt, der als zentrale Codebasis dient und die Koordination der einzelnen Entwickler ermöglicht [5.90].

In regelmäßigen Abständen werden automatisierte Build-, sowie thematisch gruppierte Verifikations-, Validierungs- und Regressionstests durchgeführt. Diese sind dazu konzipiert, die einzelnen Teilbestandteile des Codes und ihr Zusammenwirken fortlaufend zu überprüfen und zu bewerten. Zum einen handelt es sich dabei um systematische Vergleiche zwischen Simulation und analytischen Lösungen/Benchmarks für isolierte Einzelphänomene und Teilmodelle (Verifikation). Zum anderen werden umfangreiche Vergleiche zwischen Simulation und Experiment zu unterschiedlichsten Anwendungsszenarien durchgeführt (Validierung).

5.4.3.3 Verifikationsaufgaben

Angefangen von der Betrachtung isolierter Einzelphänomene, über das gezielte Austesten einzelner Teilmodelle bis hin zu Vergleichen mit analytischen sowie Benchmark-Lösungen für die verwendeten Modell-Gleichungen beinhaltet die Verifikationssuite von FDS eine umfangreiche Zusammenstellung von Testreihen zu den folgenden Bereichen (Tabelle 5.2):

Tabelle 5.2 Aufgabenfelder Verifikation

Bereich	Spezielle Aufgaben / Teilaspekte
Code-Korrektheit	Tests zu Differenzenverfahren, Randbedingungen, Symmetrieeigenschaften, Divergenzbedingung, Multi-Mesh-Verteilung, etc.
Strömungslöser	analytische Modellprobleme zum Austesten der Advektions-, Druck- und Viskositätsterme, Zeitintegration für nicht reagierende Strömungen, Vergleiche mit DNS-Rechnungen, Sensitivitätsstudien, etc.
Turbulenzeffekte	Tests zum LES-Modell inklusive unterschiedlicher SGS-Modelle, turbulenter Randeffekte, etc.
Masse- und Energieerhaltung	Tests zur Reaktion unterschiedlicher Gase, Zuverlässigkeit der Spezies-Massenanteile, etc.
Wärmestrahlung	Tests zu einfachen kalten und heißen Objekten sowie verschiedenen Absorptionsmedien, etc.
Wärmeleitung	analytische Modellprobleme zu temperaturabhängigen thermischen Eigenschaften, Tests zu Thermoelement-Modellen, etc.

Verbrennungsmodell	Tests zum Mischungsbruch- und Extinktionsmodell, zu Spezieskonzentrationen, Gaseigenschaften und Reaktionsraten, etc.
Pyrolyse	Tests zur thermischen Zersetzung von Materialien, unterschiedlichen Materialzusammensetzungen, etc.
Lagrange Partikeln	Tests zum Einsatz von Partikeln, Wassertropfen, Sprays, etc.
Heizung-, Lüftungs- und Klimatisierung	Tests zu Leckagen, Druckabfällen, Massebilanzen, etc.

Die enthaltenen Einzeltests sind relativ klein dimensioniert und benötigen nur wenig Rechenzeit, so dass jede Nacht ein Durchlauf der kompletten Suite durchgeführt werden kann. Diese engmaschige Durchführung stellt sicher, dass die täglichen Codeänderungen die bisherige Funktionalität des Codes nicht beeinträchtigen (Test auf Compilerfehler, Verletzung grundlegender Verifikationseigenschaften, etc.).

5.4.3.4 Validierungsaufgaben

Typischerweise werden im Rahmen der Validierung die für einen Realversuch experimentell ermittelten Messdaten mit entsprechenden Simulationsdaten verglichen und mögliche Unterschiede quantitativ und qualitativ bewertet. Dabei müssen sowohl die Unsicherheiten bei den experimentellen Messungen selbst als auch diejenigen bei der Definition der Modelleingaben berücksichtigt werden [5.90].

Der Vergleich mit einer Vielzahl unterschiedlicher experimenteller Anwendungsszenarien kann auf diese Weise wertvolle Bewertungskriterien liefern, ob und, wenn ja, in welchem Ausmaß die verwendeten mathematischen Simulationsmodelle tatsächlich zur Vorhersage der betrachteten physikalischen Phänomene geeignet sind oder nicht. Im Fall ungenauer Simulationsergebnisse lassen sich gegebenenfalls Rückschlüsse auf die Versagensgründe herleiten (etwa eine unzureichende Beschreibung der Feuer-Physik, beschränkte Information über die Geometrie, Brennstoffe oder Materialien, etc.)

Vor diesem Hintergrund wurde für FDS im Laufe der Jahre eine sehr große Sammlung an Versuchsbeschreibungen inklusive zugehöriger Messdaten zusammengetragen. Die Daten stammen aus Realexperimenten, die weltweit in unterschiedlichen Forschungseinrichtungen und Versuchsanstalten durchgeführt wurden. Laut Aussage der Hauptentwickler erhebt diese Datenbasis jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Aufgrund der erheblich größeren Komplexität der einzelnen Fälle erfolgt die Durchführung dieser Testreihen jedoch in größeren Abständen als die Verifikationstests und mit unterschiedlicher zeitlicher Staffelung je nach Umfang des betreffenden Einzeltests.

Die Veröffentlichung neuer Minor-Releases (mit kleineren Änderungen an der Code-Funktionalität) sowie insbesondere neuer Major-Releases (mit signifikanten Änderungen an den verwendeten Algorithmen) erfordert zwingend den erfolgreichen Durchlauf aller Validierungstestreihen und die Neuerstellung aller Auswertungsplots und -statistiken.

5 Modelle für die Brandsimulation

Üblicherweise wird innerhalb der Testreihen die Wärmefreisetzungsrates zusammen mit den Produktionsraten verschiedener Verbrennungsprodukte vorgeschrieben. Die älteren Validierungsstudien sind vorwiegend mit der Vorhersage des Wärme- und Rauchgastransports befasst.

In jüngerer Zeit sind weitere brandspezifische Phänomene in den Fokus des Interesses gerückt (z. B. Geschwindigkeit der Flammenausbreitung, Aktivierung von Sprinkler- und Detektoranlagen, etc.).

Die jeweils aktuellen Ergebnisse aller Testreihen werden unter Nennung ihrer brandschutzrelevanten Kenngrößen (z. B. Wärmefreisetzungsrates (Heat Release Rate), Branddurchmesser (Fire Diameter), Deckenhöhe (Ceiling Height), etc.) innerhalb einer Übersichtstabelle zusammenfasst und können dort im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit miteinander verglichen werden. Diese Tabelle erlaubt gleichermaßen eine aussagekräftige Bewertung der aktuell erreichten Programmqualität sowie des Projektfortschritts über die einzelnen Versionen hinweg.

Nachfolgend (Tabelle 5.3) findet sich eine exemplarische Zusammenstellung von Validierungsfällen, die innerhalb von FDS betrachtet werden:

Tabelle 5.3 Aufgabenfelder Validierung

Bereich	Spezielle Aufgaben / Teilaspekte
Feuer-Plumes	Herleitung technischer Korrelationen basierend auf den Ergebnissen vielzähliger Experimente Untersuchung von Ceiling Jets und Flammenhöhen Vergleich von Plume Centerline Temperaturen zu empirischen Korrelationen
Pool-Brände	Betrachtung unterschiedlicher Brandherd-Größen und -Brennstoffe (z. B. Methan, Ethan, Heptan, Diesel) Abschätzung der vertikalen und radialen Geschwindigkeitsprofile sowie der Massenanteilprofile Messung der thermischen Ausdehnung natürlicher Diffusionsflammen und von Temperaturkonturen lasergestützte Untersuchungen der Rußverteilung für turbulente Flammen Austesten des RTE-Lösers und des Verbrennungsmodells Vorhersagen der Verbrennungsrates als Funktion des Durchmessers Untersuchungen zum Einfluss des numerischen Gitters und der Größe des Berechnungsgebietes
Luft- und Gasausbreitung	Design reiner Lüftungssysteme (vor dem Hintergrund der Low-Mach-Number Annahme für den Strömungslöser)

ohne Brandeinfluss	unterschiedliche Belüftungsszenarien, Bewertung der Raumluftqualität Freisetzung von brennbaren Gasen in einfachen Räumen und offenen Bereichen
Wind Engineering	Berechnung von Oberflächendrücken und Seitenwindeinflüssen Untersuchung von Hindernissen in komplexen Straßenzügen Vergleiche verschiedener Turbulenz-Modelle (LES, auch im Vergleich zu RANS/Fluent) Subgrid-Skalen-Modellierung (Smagorinsky, Deardorff, Vreman)
Atmosphärische Verteilung	spezifische atmosphärische Strömungseigenschaften für Feuer/Rauch in offenen Arealen unter Berücksichtigung von Windeinflüssen Auswertung der Plume- und Rauchentwicklung von großen Rohöl-Bränden
Sich ausbreitende Brände	Vergleiche mit Brandtests am Heiß-Dampf Reaktor (HDR) in Deutschland Untersuchungen zur Ausdehnung von Feuer und Rauch in großen Räumen
Flammenausbreitung	Ausbreitung von kleinen laminaren Flammen (Millimeter bis Zentimeterbereich) Tests vom Cone Calorimeter (ISO 5660-1, 2002) bis hin umfangreichen Brandtests wie dem Room Corner Test (ISO 9705, 1993) Betrachtung vieler unterschiedlicher Einrichtungsmaterialien Herleitung von Empfehlungen zur Verwendung problemangepasster Gitterweiten und Materialeigenschaften
Raumbrände	großskalige Hochhaus-Tests (Variationen von Brandherd-Größe und -Ort, Konvektions-, Strahlungs- und Verbrennungsparametern) Messung von Temperatur und Rauchverteilung für realistische Mehrraum-Szenarien Vorhersage der Sekundärzündung und des Brandüberschlags Untersuchungen in mechanisch belüfteten Großräumen Turbulenzeigenschaften der Strömungs- und Temperaturfelder (half-scale ISO Room Fire Test) Untersuchungen von Temperatur- und Rauchverteilungen in realistischen Mehrraum-Szenarien

Sprinkler –und Wasserdnebel-Anlagen	Abbildung von Aktivierungszeiten Überprüfung von Sprinkleraktivierungsvorhersagen für Hochregallagerbrände mit Lager-Chemikalien Absorption von Wärmestrahlung durch Wasserdnebelssysteme
Tunnelbrände	Nachsimulation von Tunnel-Experimenten mit und ohne Belüftung Wärmestrom- und Rauchmessungen im Zusammenhang mit Sprinklerungen qualitative Analyse für einen LKW-Brand in einem Tunnel
Rauchdetektion	Vorhersage der Aktivierungszeiten von Rauchmeldern Vergleiche der Temperaturen, Gasgeschwindigkeiten und -konzentrationen an verschiedenen Detektorpositionen
Verbrennungsmodell	Vergleiche der spektralen Strahlungsintensitäten kleiner Brände Messungen von Temperatur, Luftgeschwindigkeit, Gaskonzentration, unverbranntem Kohlenwasserstoff und Wärmeströmen Vergleiche für einen Methangasbrenner bei natürlicher Belüftung
Rußablagerung	Untersuchung der Auswirkungen von Rußablagerung auf die Vorhersage von Rauchkonzentrationen, Rauchmelderaktivierungszeiten und Erkennungsweite Rußdichten und -ablagerungen an Wänden für verschiedene Brennstoffe
Rekonstruktion von Schadenfeuern	Nachsimulationen bekannter Großbrände, z.B. WTC, Station Nightclub in Rhode Island, uvm.

5.5 Modellanwendung

5.5.1 Allgemeines

In den folgenden Kapiteln werden die grundlegenden Schritte bei der Anwendung von mathematischen Modellen zur Brandsimulation aufgezeigt. Die einzelnen Anwendungsschritte sind stark von den individuellen Submodellen abhängig, die in den verwendeten Brandsimulationsmodellen vorgesehen sind. In [5.54] wird für die Ausführung einer CFD-Berechnung das in Bild 5.10 aufgeführte Ablaufschema für eine Brandsimulation vorgeschlagen. Zu den einzelnen Schritten zählen dabei die Auswahl des Szenarios (Kapitel 5.5.2) und des Modelltypes

(Kapitel 5.5.3) sowie die Auswertung (Kapitel 5.5.4) und die Dokumentation der Ergebnisse (Kapitel 5.5.5).

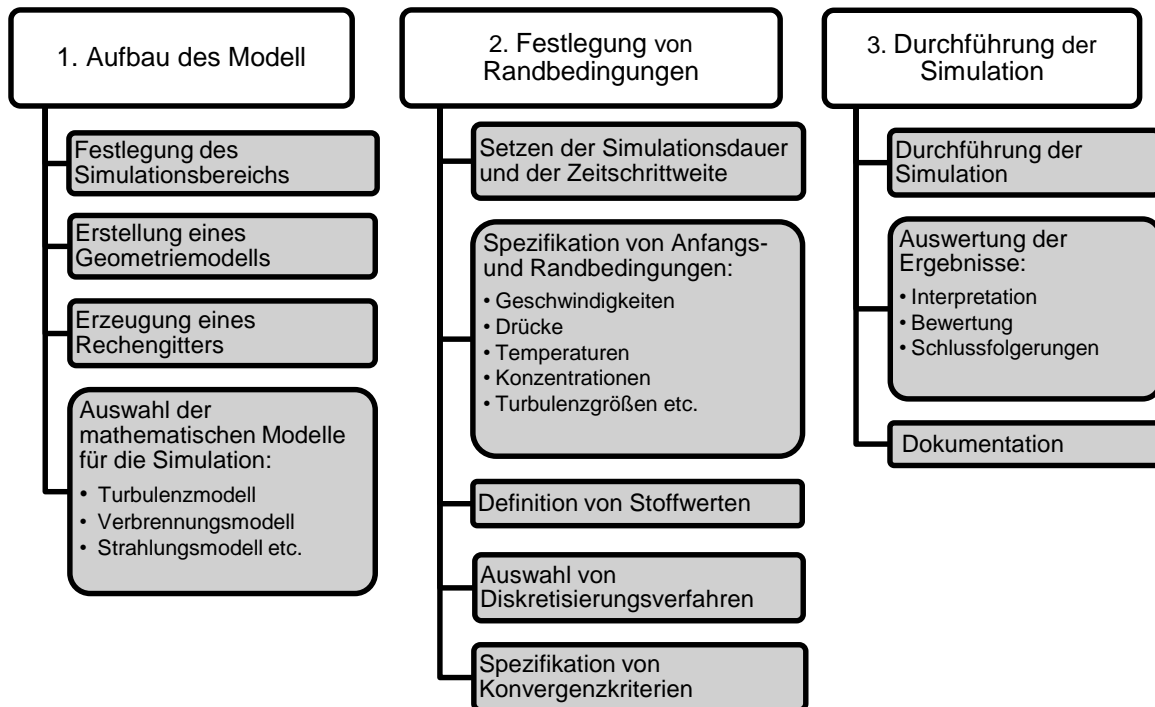


Bild 5.10 Ablaufschema für eine Brandsimulation nach [5.54]

5.5.2 Auswahl der Szenarien

Der Begriff Brandszenario wird hier als die Zusammenfassung der wesentlichen Rand- und Anfangsbedingungen einer durchzuführenden Brandsimulationsrechnung verstanden. Dazu gehören im Allgemeinen folgende Festlegungen:

- Zeitlicher Verlauf der Abrand- bzw. Wärmefreisetzungsrates des Brandes ggf. unter Berücksichtigung vorhandener Einflussgrößen wie beispielsweise Löschmaßnahmen,
- Angaben zur chemischen Reaktion, insbesondere zu Ausbeuten (z. B. Ruß),
- Lage und Größe von Zu- und Abluftöffnungen (z. B. RWA), bzw. allgemein die Ventilationsbedingungen,
- Umfang des Berechnungsgebiets (Brandraum und angrenzende Räume) und
- spezifische Annahmen.

Diese Liste ist offen, da je nach Aufgabenstellung spezifische Randbedingungen betrachtet und berechnet werden, die Einfluss auf die Eingangsdaten einer Modellierung haben. Durch die Auswahl der Szenarien ergibt sich dann eine für die Aufgabenstellung abdeckende Untersuchung von Systemzuständen, die für die Beantwortung der relevanten Fragestellungen ausreicht.

Beispiele für unterschiedliche Szenarien sind unterschiedliche Brandverläufe bei sonst gleichen Ventilationsbedingungen oder die Veränderung von Ventilationsbedingungen bei Erreichen einer bestimmten Temperatur. Bei Temperaturberechnungen können unterschiedliche Szenarien schon durch die Betrachtung unterschiedlicher Orte der Wärmebeaufschlagung erforderlich sein.

Die Auswahl der Szenarien findet ihre Entsprechung in unterschiedlichen Eingabedaten für die Simulationsrechnung. Da sich CFD-Modelle und Mehrraum-Mehrzonenmodelle hinsichtlich ihres Detaillierungsgrads unterscheiden, ist es möglich, dass die Szenarienauswahl auch von der Wahl des Modells oder des Berechnungsverfahrens abhängt.

5.5.3 Auswahl des Modelltyps

Im Rahmen von Brandschutznachweisen treten eine Reihe von Fragestellungen auf, die mit unterschiedlichen Ingenieurverfahren bearbeitbar sind. Neben den klassischen Aufgabenstellungen, wie der Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen oder der Bestimmung von Temperaturverläufen, können auch Themen wie z. B. auftretende Wärmestrahlung, Auslösezeitpunkte von Sprinklern oder automatischen Rauchmeldern behandelt werden. Eine vollständige Behandlung der bestehenden Möglichkeiten würde jedoch den einführenden Charakter dieses Kapitels sprengen, daher erfolgt eine Beschränkung auf die oben genannten klassischen Aufgaben.

Für die Auswahl des Modelltyps ist bereits die Aufgabenstellung bedeutsam. Wie bereits dargestellt, sind z. B. nicht alle Modelle für die Berechnung lokaler Temperaturwerte gleichermaßen geeignet. Zonenmodelle müssen hierfür durch Algorithmen ergänzt sein, wie sie in den Kapiteln über Plume-Modelle und Ceiling Jet-Modelle, beschrieben sind. Sind sie nicht im Modell enthalten, dann sind separate Berechnungen mit Hilfe der angegebenen Gleichungen möglich.

Während sich bei Ingenieurformeln und einfacheren Rechenverfahren Anwendungsgrenzen oft aus dem Gültigkeitsbereich der zu Grunde liegenden empirischen Relationen und den eingeführten vereinfachenden Annahmen ergeben, lassen sich bei den CFD-Modellen ähnlich generelle Beschränkungen des Anwendungsbereiches nicht ohne Weiteres festlegen. Dies liegt an der lokalen, die fundamentalen physikalischen Erhaltungsgesetze berücksichtigenden Beschreibung der Rauch- und Wärmeausbreitung. Prinzipielle Anwendungsgrenzen etwa hinsichtlich der räumlichen Dimension, der baulichen Komplexität oder der Stärke einer Brandquelle lassen sich aus dem Feldmodellansatz nicht ableiten. Praktische Anwendungsgrenzen ergeben sich aus der gewählten Struktur des Rechengitters (und damit auch aus der verfügbaren Rechenkapazität), den gewählten Randbedingungen sowie der Forderung, dass bei bestimmten Fragestellungen geeignete Untermodelle (z. B. für die Wärmestrahlung) integriert sein müssen. Bei Temperaturberechnungen ist überdies die Modellierung der Brandquelle und ggf. die Gitterweite zu beachten. Bei großer Gitterweite und kleiner Energiedichte (große Volumenquelle) können sich je nach Modell größere Abweichungen ergeben.

Die Frage nach den Anwendungsgrenzen eines bestimmten Feldmodells lässt sich letztlich nur unter Bezug auf den konkreten Anwendungsfall beantworten. Daher gilt allgemein, dass Problemstellungen, die eine detaillierte rechnerische Behandlung komplexer Raumströmun-

gen (Kombination aus Raumgeometrie, auftriebsbehafteter Konvektionsströmung und Ventilation) und der damit einhergehenden Phänomene der Rauch- und Wärmeausbreitung beinhalten, in der Regel den Einsatz eines CFD-Modells erfordern.

Der dreidimensionale lokale Feldmodellansatz bringt es mit sich, dass eine große Datenmenge zu verwalten ist. Hier sind geeignete Visualisierungs- und Dokumentationsmöglichkeiten gefordert, wie sie von modernen Programmen in der Regel geboten werden. Für die quantitative Analyse sind Zeitdiagramme (Entwicklung der Gastemperatur, Bauteiltemperatur, Rauchdichte oder Schadstoffkonzentration in lokal begrenzten Bereichen oder an ausgewählten Punkten) sowie zweidimensionale Schnittbilder (als Farbkarten oder Isoliniendarstellungen) das geeignete Mittel. Um sich einen Überblick über die mitunter recht komplexen Rauchgas- und Ventilationsströmungen zu verschaffen, ist unterstützend oft auch eine dreidimensionale Darstellung hilfreich, u. U. auch in der Form von während der Simulation generierter Videosequenzen.

CFD-Modelle werden in nahezu allen in Frage kommenden Bereichen eingesetzt, von Testbränden im Labor über Wohnungsbränden bis hin zu Großbränden z. B. in Industriehallen, Atrien, Versammlungsstätten oder Bürogebäuden. Wegen ihrer Fähigkeit, die Strömungsverhältnisse im Innern der Gebäude zu berechnen, werden CFD-Modelle besonders oft zur Simulation von Rauchausbreitung und Entrauchungsmaßnahmen eingesetzt. Weitere bedeutende Anwendungsgebiete sind die automatische Brandentdeckung sowie die Bauteilbemessung. In letzterem Fall bieten CFD-Modelle auch die Möglichkeit, die Wärmebelastung von teilweise freien Strukturen wie z. B. Apparategerüsten zu untersuchen. Außerdem lassen sich CFD-Modelle für die Rekonstruktion von Brandereignissen und ihren Konsequenzen einsetzen.

Für Zonenmodelle ergeben sich aus den theoretischen Grundlagen allgemein Einschränkungen, welche die Genauigkeit der Berechnung oder ihre Gültigkeit beeinflussen können. Die nachstehenden Hilfestellungen orientieren sich an den Leitlinien für die Anwendung von Zonenmodellen der zuständigen Arbeitsgruppe der ISO [5.72].

Da die Impulsgleichung nicht gelöst wird, werden alle Strömungsvorgänge als instant angesehen. Diese Annahme ist für relativ kleine Räume begründet, bei größeren Räumen ergeben sich daraus Abweichungen bei Strömungsvorgängen welche einen unterschiedlichen Zeitraumen benötigen. Dies kann zwar in der Anfangsphase zu konservativen Ergebnissen führen, die sich jedoch zu einem späteren Zeitpunkt umkehren können. Diese Strömungsvorgänge führen ganz allgemein nach einer gewissen Zeitdauer zu Ungleichförmigkeiten in der Konzentration von Rauchgasbestandteilen, der Temperatur oder der Position der Rauchgasuntergrenze. Dies wird u. a. hervorgerufen durch Schwerewellen, Verlust von Auftrieb, Wärmeverluste, etc.. Strömungsvorgänge an Öffnungen werden überdies allein über einen Durchflussbeiwert beschrieben und nicht durch die jeweilige genaue Geometrie. Auch hierdurch können sich Abweichungen ergeben.

Der Rauchgastransport von der unteren Luftschicht zur Rauchgasschicht wird durch die Plummmodelle beschrieben. Hierfür existieren unterschiedliche Modelle, welche sich erheblich in den Ergebnissen unterscheiden können. Da diese Modellvarianten alle auf sogenannte Entrainment-Koeffizienten angewiesen sind, übertragen sich die experimentellen Ungenauigkeiten bei der Bestimmung dieser Koeffizienten auf die Modelle. Diese Ungenauigkeiten stammen

beispielsweise daher, dass die Koeffizienten häufig in ruhiger Strömungsumgebung gemessen wurden. Im Gegensatz dazu kann eine erhebliche Beeinflussung des Plumes durch Zuluftströmungen oder Lüftungsgeräte auftreten. Diese Strömungsvorgänge beeinflussen die Einmischung in die Rauchgassäule (Plume) und können zu erheblichen Mischvorgängen mit entsprechendem Raucheintrag in die Luftschicht führen. Ein Beispiel hierfür sind hohe Luftgeschwindigkeiten im Bereich des Plumes.

Die Plumemodelle, bzw. angepasste Varianten, werden auch zur Beschreibung des Überströmens von Rauchgasen aus einem Raum in einen anderen herangezogen. Auch hier werden einige Annahmen getroffen, die eine gewisse Fehlerbandbreite beinhalten und sich dementsprechend auf die Ergebnisse auswirken. Zu den Annahmen gehören wiederum der Entrainment-Koeffizient und die geometrische Form des Plumes sowie die Einführung einer virtuellen Quelle. Dies ist auch der Grund dafür, dass die Unterteilung in virtuelle Räume nicht zwangsläufig zu genaueren Ergebnissen führt. Beispielsweise kann der sogenannte Spill-Plume einen höheren Entrainment-Koeffizienten aufweisen als der achsensymmetrische Plume. Strömungsvorgänge im Plume oder durch Öffnungen enthalten daher eine Reihe von Ungenauigkeiten, die sich im Zusammenhang mit den erforderlichen Eingabedaten bezüglich der Raumgeometrie (z.B. ungleichförmig geformte Rauchbereiche mit unterschiedlichen Höhen), der Öffnungen (s. o.) und der Raumanzahl summieren können. Daher ist es keineswegs gesichert, dass eine Raumaufteilung in mehr Räume das Ergebnis verbessert. Aufgrund der genannten Einflüsse kann sogar das Gegenteil eintreten.

Zonenmodelle beschreiben generell keine lokalen Effekte wie sie sich beispielsweise für Isothermen oder die Rauchgaskonzentration in einem spezifischen Raumbereich ergeben. Für die Beurteilung von Fragestellungen, bei dem solche lokalen Effekte eine Rolle spielen, sind sie daher nicht geeignet.

Große Abweichungen können generell in relativ niedrigen Räumen auftreten. Hier beeinflusst die in der Realität auftretende Flammenform (Umlenkungen der Decke) die Ergebnisse genauso wie die auftretende Instabilität der Rauchgasschicht bei größeren Entfernungen zum Brandort. Insbesondere beeinflussen Hindernisse an der Decke (z. B. Unterzüge) die Ergebnisse. Generell sind geometrisch komplexe Räumlichkeiten mit komplizierten Deckenformen für die Beschreibung durch Zonenmodelle nur eingeschränkt geeignet. Je näher die Geometrie rechteckigen Formen entspricht, umso geeigneter die Zonenmodelle.

Da Zonenmodelle die Ausbildung einer relativ gleichförmigen Schichtung voraussetzen (und deren Existenz nicht überprüfen kann), kann ggf. ein relativ kleiner Brand in einem großen Raum u. U. nicht ausreichen, um diese Voraussetzung zu erfüllen. Einige Forscher haben daher ein Minimum von 0,1 kW pro m³ Raumvolumen als notwendige Untergrenze für die Wärmefreisetzungsrates vorgeschlagen. Dieser Vorschlag ist einerseits sehr pragmatisch, andererseits vernachlässigt er andere Einflussgrößen wie beispielsweise die Zuluftgeschwindigkeit.

Die genannten Annahmen und Ungenauigkeiten haben ihre Auswirkungen auch bei der Anordnung von virtuellen Räumen, d. h. der Aufteilung eines gegebenen Raumvolumens in kleinere virtuelle Räume mit Öffnungen in der vollen Größe der Raumbreite. Hier können die genannten Annahmen und Ungenauigkeiten einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben.

In welche Richtung die Ergebnisse beeinflusst werden, ist hierbei nicht durch die Physik bestimmt, sondern durch die relativ willkürliche Auswahl der virtuellen Räume.

In der nachstehenden Tabelle 5.4 werden einige prinzipielle Eigenschaften von Zonen- und CFD-Modellen unter dem Gesichtspunkt des Brandschutzingenieurwesens miteinander verglichen. Die Charakterisierung der Eigenschaften unterliegt dabei einer subjektiven Einschätzung bezüglich des Umfangs und der Genauigkeit und sagt noch nichts über die Anwendungsmöglichkeit im Zusammenhang mit einer speziellen Fragestellung aus.

Aufgrund der Unterschiede in den physikalischen Ansätzen ist die Aussagefähigkeit von Zonen- und CFD-Modellen unterschiedlich, d. h. der Umfang der berechneten Größen weicht stark voneinander ab.

Tabelle 5.4 Grundsätzliche Eigenschaften von Feld- und Zonenmodellen (siehe auch [5.36], [5.37], [5.38])

Eigenschaft	Zonenmodell	CFD-Modelle
Geometrieerfassung	angenähert	angenähert bis exakt
Lüftungserfassung	angenähert	angenähert bis exakt
Wärmefreisetzung	angenähert	angenähert
Modellaufwand	gering	hoch
Aussagen	global , bzw. Mittelwerte	lokal
Validierung	aufwendig	aufwendig
Rechenaufwand	gering bis mittel	hoch

Für alle Modelle gilt gleichermaßen, dass Fehler in den Eingangsdaten zu entsprechenden Fehlern bei den Ergebnissen führen.

5.5.4 Interpretation der Ergebnisse

Vor der Interpretation der Ergebnisse sollte der Anwender von Ingenieurverfahren einen Plausibilitätscheck der Ergebnisse durchführen. Dies beinhaltet beispielsweise die Prüfung von Temperaturverteilungen auf unrealistische Werte oder den Vergleich der zeitlichen Entwicklung von Temperaturwerten, Rauchgasschichtentwicklung und Massenströmen mit denjenigen des Brandverlaufs. Da diese Werte mit der Wärmefreisetzungsrates korrelieren, müssen sie in gewissem Umfang der zeitlichen Entwicklung folgen (zumindest in der Anfangsphase). Auf diese Weise lassen sich grobe Fehler, die aus Fehleingaben oder der Überschreitung von Anwendungsgrenzen resultieren, eliminieren.

Die eigentliche Interpretation der Ergebnisse sollte vor dem Hintergrund eines erweiterten Wissensspektrums erfolgen, welches neben experimentellen Ergebnissen auch Kenntnisse aus

Vergleichsrechnungen umfasst. Dabei geht es im Wesentlichen um die Feststellung, ob die Ergebnisse aus der gewählten Modellanwendung tatsächlich anwendbar sind oder zusätzliche Betrachtungen erfordern. Beispielsweise kann das Ergebnis zu der Erkenntnis führen, dass der Anwendungsbereich des gewählten Modells überschritten wurde oder die Ergebnisse zumindest einen größeren Fehler aufweisen können. Dann ist die Entscheidung zu treffen, ob zusätzliche Berechnungen mit dem gleichen Modell oder Berechnungen mit einem anderen Modell notwendig sind. In jedem Fall setzt diese Bewertung der Ergebnisse eine gewisse Erfahrung im Umgang mit den angewandten Verfahren und Kenntnisse der physikalischen Grundlagen voraus.

Für den beschriebenen Arbeitsschritt existieren keine verbindlichen Regeln, daher können allenfalls Beispiele genannt werden. Bei der Interpretation und Bewertung von Temperaturberechnungen ist es beispielsweise ratsam, die Rechenergebnisse mit experimentellen Ergebnissen zu vergleichen, die ähnliche Randbedingungen aufweisen. Liegen solche Ergebnisse nicht vor, sollte der Anwender mit dem gewählten Verfahren Vergleichsrechnungen anhand verfügbarer Experimente durchgeführt haben, um sicherzustellen, dass grundsätzlich die richtige Verfahrensweise gewählt wurde.

Die Anwendung von Feldmodellrechnungen zur Temperaturbestimmung kann stark von der Modellierung der Brandquelle abhängig sein. Es ist daher in diesem Fall zu prüfen, ob das Rechenergebnis tatsächlich schon den ungünstigsten Fall beschreibt, der für die Auslegung maßgebend ist.

Bei der Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen muss insbesondere anhand der Ergebnisse überprüft werden, ob die Voraussetzungen für die Anwendung des gewählten Modelltyps noch gegeben sind. Diese ist beispielsweise bei mittleren Rauchgastemperaturen mit geringem Unterschied (wenige Grad) zu den Umgebungstemperaturen u. U. die Schichtungsstabilität nicht mehr gegeben. Es ist dann anhand weiterer Ergebnisse (z. B. optische Dichte der Rauchgase) zu prüfen, ob dennoch Aussagen getroffen werden können.

Sind diese Überlegungen abgeschlossen, kann im Abgleich mit den angestrebten Bemessungszielen die Auslegung vorgenommen werden.

5.5.5 Anforderungen an die Dokumentation

Grundsätzlich muss eine Dokumentation die Nachweisführung nachvollziehbar machen. Da die Nachvollziehbarkeit in hohem Maß auch vom Kenntnisstand des Lesers abhängt, können sich daraus erhebliche subjektive Unterschiede in den Anforderungen ergeben. Diese sind vom Ersteller eines Nachweises naturgemäß nicht voraussehbar, andererseits müssen mindestens bestimmte Eckdaten für eine Plausibilitätsbetrachtung vorliegen.

Die folgende Zusammenstellung (siehe Tabelle 5.5) ist als eine Liste anzusehen, welche die grundsätzlich erforderlichen Angaben für die Auswertung einer Brandsimulation (hier: zum Nachweis der Entrauchung) enthält. Bei Untersuchung weiterer / anderer ingenieurmethodischer Fragestellungen, sind die Inhalte der Dokumentation an die Aufgabenstellung anzupassen (z. B. bei Anwendung im Rahmen einer Heißbemessung oder besonderen Schutzzielen des Bauherrn). Weitere Grundsätze der Dokumentation sind in [5.73], und [5.74] enthalten.

Tabelle 5.5 Zusammenstellung grundsätzlicher Anforderungen für die Dokumentation

Inhalt	Bemerkungen
Aufgabenstellung	Zielsetzung der Untersuchung bzw. des Entrauchungskonzeptes
Grunddaten / Geometrie	<p>Verantwortlich beteiligte Personen, Institutionen</p> <p>Datum und Version der eingereichten Dokumentation</p> <p>Nennung der verwendeten Pläne (Bezeichnung, Plan-Nr., Revisionsdatum)</p> <p>Nennung der weiteren verwendeten Grundlagen (z.B. 3D-Modelle, Abstimmungen)</p> <p>Beschreibung des Objektes mit den vorgesehenen Nutzungen</p> <p>Verweis auf zugehörige Brandschutzkonzepte</p> <p>Geometrische Beschreibung des Simulationsbereiches</p>
Brandschutzmaßnahmen	Beschreibung der im Zusammenhang mit der RWA maßgebenden baulichen (wie Rauchabschnitte), technischen (wie Brandmelde-, Sprinkleranlagen), organisatorischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen
Schutzziele	<p>Definition und Erläuterung der Schutzziele wie (Personenschutz, wirksame Löscharbeiten, der Brandausbreitung vorbeugen, Sachschutz, zusätzliche Schutzziele)</p> <p>Festlegung zur Beurteilung der Schutzzieleerfüllung erforderlichen Auswertekriterien und deren Grenzwerte</p> <p>Definition der für die Schutzzieleerbringung relevanten Zeiträume</p>
Entrauchungskonzept	<p>Rechtliche / Normative Grundlagen</p> <p>Erläuterung des Entrauchungskonzeptes, falls notwendig: Visualisierung in Plänen</p> <p>Definition der Nachström- und Absaugstellen (Ort, Lage, Größe, Strömungsgeschwindigkeit, Volumenstrom)</p> <p>bei natürlichen Zuluftöffnungen / NRWG: Angabe der geometrisch freien bzw. aerodynamisch wirksamen Flächen</p> <p>Weitere Anforderungen an die Entrauchung / Entrauchungsanlage (z.B. hinsichtlich Wärmebeständigkeit und Funktionssicherheit)</p> <p>Systemgrenzen</p>
Steuer- und Regelsystem	<p>Manuelle / automatische Auslösung von Komponenten der Entrauchung</p> <p>Weitere relevante Brandfallsteuerungen</p>

<p>RWA, Brandfallsteuerung</p>	<p>Definition der Auslösekriterien (wie Ein- oder Zweimelderkriterium)</p> <p>Im Rahmen des Entrauchungsnachweises berücksichtigte Zeitabläufe (Detektion, Steuern, Regeln, programmierte Verzögerungen)</p> <p>Erläuterung der Anforderungen an die Brandfallsteuerung bzgl. der Entrauchungskonzeption</p> <p>Ggf. Maßnahmen zum Handling von Windeinflüssen</p>
<p>Bemessungsbrand (hier ist insbesondere das Kapitel 4 zu Grunde zu legen)</p>	<p>Benennung der Brandlasten, Verortung</p> <p>Herleitung und Erläuterung der relevanten Bemessungsbrände inkl. der Brandpositionen und Ventilationsbedingungen (brandlastgesteuert / ventilationsgesteuert)</p> <p>Einfluss von Sprinkleranlagen / Maßnahmen der Feuerwehr</p> <p>Bei Berücksichtigung des Einflusses von Sprinkleranlagen:</p> <p>Beschreibung zur Berücksichtigung der Sprinklerwirkungen im Modell</p> <p>Ansprechempfindlichkeit (RTI-Wert)</p> <p>Nennauslösetemperatur</p> <p>Geometrische Rahmenbedingungen (Raumhöhe, Sprinklerabstände untereinander / zur Decke)</p> <p>Brandparameter:</p> <p>Verlauf der Wärmefreisetzungsrates</p> <p>Verlauf der örtlichen Ausdehnung der Brandfläche</p> <p>Zusammensetzung des Brennstoffes</p> <p>Spezifische Wärmefreisetzungsrates</p> <p>Verbrennungsmodell, Strahlungsmodell</p> <p>Strahlungsanteil, Heizwert</p> <p>Soot Yield, Weitere Yields (CO, CO₂, ...)</p>
<p>Randbedingungen</p>	<p>Maßgebende klimatische Bedingungen (Wind, Temperaturen außen / innen)</p> <p>Wandtemperaturen</p> <p>Berücksichtigung des Versagens von Bauteilen (z.B. Versagen von Verglasungen)</p> <p>Relevante Strömungen im Gebäude, falls vorhanden</p>

Dokumentation der verwendeten Programme / Modelle	Dokumentation des verwendeten Modells inkl. Bewertung der Verwendbarkeit für die untersuchte Aufgabenstellung Vernetzung (Art des Rechengitters, Anzahl der Netze, Zellenanzahl und -größe)
Dokumentation der verwendeten Nachweisführung	Erläuterung und Begründung der Auswertungskriterien und der gewählten Darstellungsform Grafische Auswertungen anhand von Diagrammen oder Tabellen Bildliche Auswertungen wie Horizontal- und Vertikal-Schnitte in aussagekräftigen Zeitschritten (z.B. 5-minütig) ggf. mit beschreibenden Textpassagen Diskussion/Interpretation der Ergebnisse
Schlussfolgerungen/ Empfehlungen	Schlussfolgerungen / Zusammenfassung

5.5.6 Beispiele zu Anwendungsgrenzen

Im Folgenden sollen Anwendungsgrenzen beim Einsatz von Brandsimulationsmodellen durch zwei Beispiele aufgezeigt werden. Diese Grenzen sind übertragbar auf Aufgaben, die sich dem Brandschutzingenieur bei der Dimensionierung der Anforderungen in realen Gebäuden regelmäßig stellen. Weitere typische Anwendungsfälle sind auch in A5.3.2 Beispiele und Experimente für Vergleichsrechnungen zu finden.

Beispiel 1

Das erste Beispiel behandelt den Fall von Zuluftinflüssen. Hier lag die Rauchgasschicht im Bereich der Zuluftöffnungen, sodass sich eine Grenzschicht ausbildete, bei der einströmende Zuluft mit relativ hoher Geschwindigkeit in unmittelbarem Kontakt mit ausströmenden Rauchgasen kam. Die entstehenden Instabilitäten führten innerhalb kurzer Zeit zu einer starken Verwirbelung, die in der CFD-Simulation prognostiziert wurden. Dies wird in Bild 5.11 gezeigt. Die dargestellten Ergebnisse korrespondierten mit den durchgeführten Rauchversuchen.

Es wurden folgende Randbedingungen untersucht:

- Ein Bürogeschoss wird durch eine langgestreckte rechteckige Grundfläche angenähert. Dieser Raum hat eine Länge von 150 m, eine Breite von 20 m und eine Höhe von 3,13 m,
- Die untergehängte offene Rasterdecke wird durch quer angebrachte Streifen einer Breite von 2 cm und einer Höhe von 20 cm simuliert. Diese Streifen befinden sich in der Höhe 2,67 m bis 2,87 m über dem Boden,

5 Modelle für die Brandsimulation

- An den beiden Längsseiten befinden sich insgesamt 9 Türen mit einer Breite von 0,8 m und einer Höhe von 2,5 m. In der vorderen Wand befinden sich 5, in der hinteren 4 dieser Türen,
- Zur Rauchabführung wird eine maschinelle Absauganlage simuliert. Die Absaugöffnungen sind im Abstand von 10 m auf der Mitte der Längsachse angeordnet. Jede Absaugöffnung hat eine Fläche von 4 m². Die Gesamtleistung der Absauganlage beträgt im 1. Fall ca. 75.000 m³/h, im 2. Fall 150.000 m³/h,
- Es wird der Brand einer Büroeinrichtung unterstellt, der sich 5 Minuten lang ungehindert ausbreitet bevor die Sprinkleranlage aktiviert wird und die weitere Ausbreitung des Feuers beendet. Es wird konservativ angenommen, dass die Wärmefreisetzungsrate / Abbrandrate bis zur manuellen Löschung des Brandes konstant bleibt. Die maximale Wärmefreisetzungsrate beträgt 1,2 MW. Der Brandherd hat eine Fläche von 2 m² und befindet sich im Abstand von 5 m vom linken Ende des Brandraums auf der Längsachse,
- Die Brandsimulation erfolgte mit dem Computational-Fluid-Dynamics (CFD) – Programm Fire Dynamics Simulator FDS vom NIST, USA [5.20], [5.21].

Im 1. Fall ist aufgrund der geringeren Absaugleistung die Verwirbelung weniger stark, sodass in Bodennähe eine geringere Rauchgaskonzentration herrscht. Allerdings breiten sich die Rauchgase schneller in Längsrichtung aus.

Im 2. Fall herrscht über die gesamte Höhe eine unakzeptabel hohe Rauchgaskonzentration. Dies wird durch die stärkere Verwirbelung bei der höheren Absaugleistung verursacht. Allerdings breitet sich die Front der Rauchgase langsamer aus, als im 1. Fall.

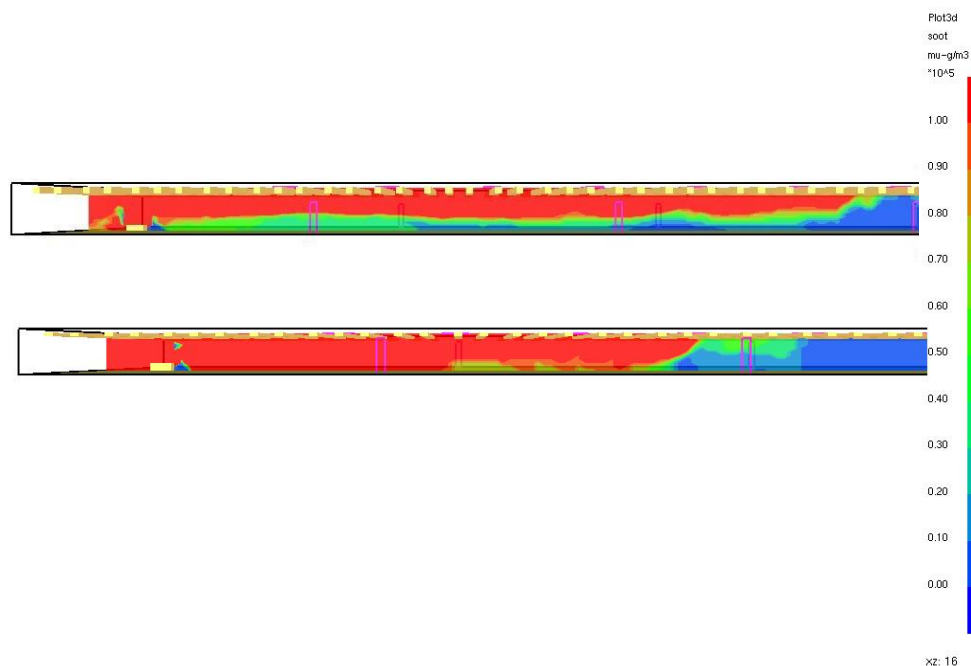
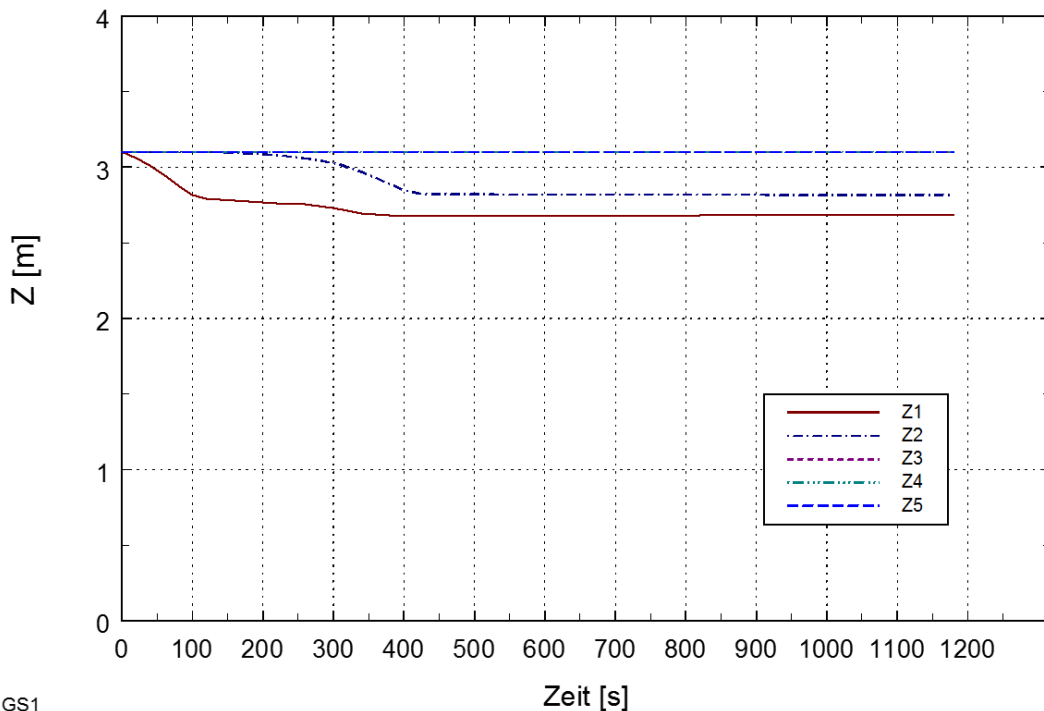


Bild 5.11 Rußkonzentration in der mittleren Längsebene nach 600 s, Oben im Bild: Leistung der maschinellen Abluft ca. 75.000 m³/h, Unten im Bild: Leistung der maschinellen Abluft ca. 150.000 m³/h

Bild 5.12 zeigt die entsprechenden Ergebnisse, die mit einem Zonenmodell für den 2. Fall (150.000 m³/h) berechnet wurden. Bei dieser Berechnung wurde der Raum in fünf Segmente von 30 m Länge unterteilt. Auf diese Weise kann auch die Rauchausbreitung beurteilt werden. Die Rasterdecke ist im Zonenmodell nicht unmittelbar darstellbar und kann allenfalls nur durch eine feinere Segmentierung berücksichtigt werden.

Der Vergleich zeigt, dass nicht nur die Rauchgasschicht deutlich geringer ausfällt, sondern auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandrauchs. Die entstehenden Verwirbelungen werden nicht erfasst.



GS1
Bild 5.12 Rauchgasfreie Schicht nach Berechnung mit CFAST (für die Segmente 1- 5)

Beispiel 2

Das Beispiel 2 beinhaltet die Berechnung eines sehr hohen Luftraums mit folgenden Randbedingungen:

- Nutzung: auch für Veranstaltungen genutzter Atriumbereich in einem Bürogebäude mit 7 angrenzenden oberirdischen Geschossen,
- Maximale Höhe Atrium ca. 27 m, variable Deckenhöhe,
- Grundfläche Atrium: variabel je nach Geschoss, im EG ca. 17 m x 40 m, in den Obergeschossen ca. 45 m x 20 m,
- Genutzte Bereiche in den Obergeschossen des Atriums teilweise am Rand vorhanden, Verknüpfung dieser Bereiche über geschossverbindende Brücken quer durch das Atrium,
- Entrauchung: Maschinelle Entrauchung mit 3 Absaugpunkten unter dem Dach des Atriums und insgesamt 300.000 m³/h Entrauchungsvolumenstrom,

5 Modelle für die Brandsimulation

- Zuluftführung: über Nachströmöffnungen in der Fassade im Erdgeschoss,
- Brandszenario: Brand im Erdgeschoss des Atriums (nicht gesprinklet) mit maximaler Wärmefreisetzungsrate von 6 MW,
- Die Brandsimulation erfolgte mit dem Computational-Fluid-Dynamics (CFD) – Programm Fire Dynamics Simulator FDS, Version FDS 6.7.0.

Bild 5.13 veranschaulicht die Berechnungsergebnisse für die Auslegung der Entrauchung mit dem vorgenannten CFD-Modell. Dargestellt ist die optische Dichte. Man erkennt, dass bei dem gewählten Brandort die hohen optischen Dichten dort auftreten, wo sich die Rauchgase stauen.

Auch in diesem Fall ist nicht zu erwarten, dass ein Zonenmodell die detaillierten Unterschiede in der optischen Dichte reproduziert. Dies begründet sich darin, dass ein Zonenmodell die aufgrund der hohen Volumenströme auftretenden Wechselwirkungen zwischen Zuluftströmung und Rauchschicht nicht berücksichtigen kann. Auch die Wechselwirkungen des Plumes mit den geometrischen Hindernissen im Atrium wären in diesem Fall mit einem Zonenmodell nicht darstellbar.

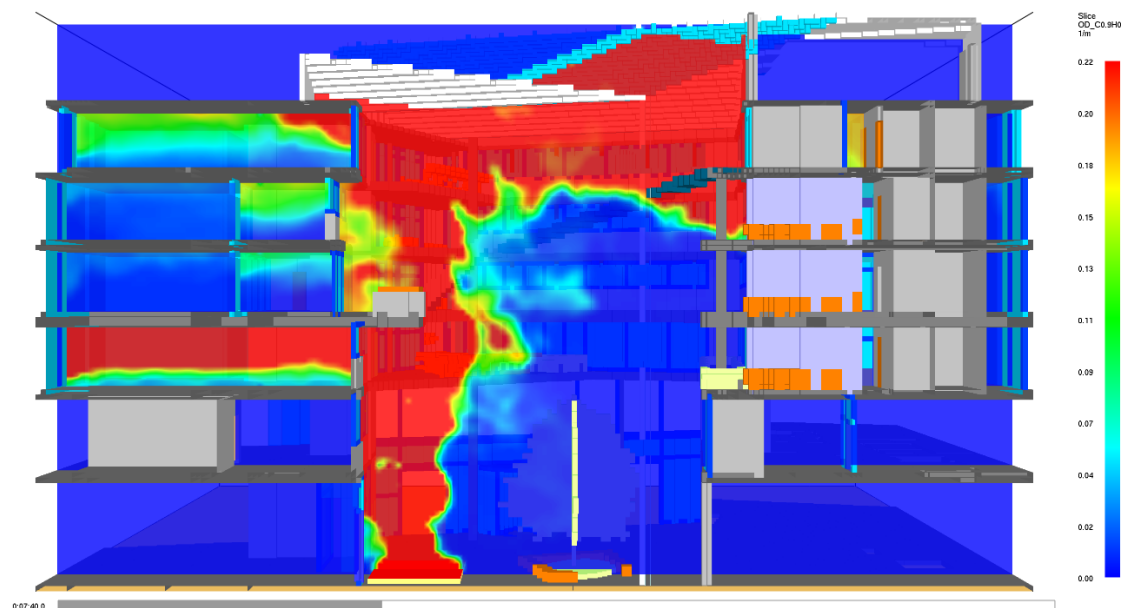


Bild 5.13 Optische Dichte als Berechnungsergebnis einer Feldmodellrechnung

Die Beispiele zeigen, dass sich der Anwender von Modellen über die Randbedingungen im Klaren sein muss, bevor eine Modellart zur Auslegung gewählt wird. Sie sind darüber hinaus auch Beispiele für Vergleichsrechnungen, durch die qualitativ die geeignete Modellform ermittelt werden kann.

Weitere Experimente, welche sich zur Bewertung eignen, sind in [5.34] [5.35] [5.70] [5.71] beschrieben. Dabei handelt es sich im ersten Fall um die Rauchgasausbreitung über 3 Räume unterschiedlicher Größe.

5.6 Auswirkungen ausgewählter numerischer und physikalischer Randbedingungen

5.6.1 Allgemeines

Mit dem zunehmenden Einsatz von CFD-Modellen zur Brandsimulation und dem Einsatz neuer Submodelle können eine Vielzahl von Brandphänomenen mit betrachtet werden, die bei Zonenmodellen noch unberücksichtigt blieben.

Im Folgenden werden ausgewählte numerische und physikalische Randbedingungen betrachtet, die Einfluss zum einen auf die Prognosefähigkeit von Simulationsmodellen nehmen (räumliche und zeitliche Diskretisierung) und zum anderen weitergehende Betrachtung erfordern und über die Modellierung des ursächlichen Brandes hinausgehen (Hintergrundströmungen, Wind, Sprinkleranlagen).

5.6.2 Wahl der Gitterauflösung

Für Simulationen mit Auftriebsplumes ist ein Maß für die Qualität der numerischen Auflösung des Strömungsfelds der dimensionslose Ausdruck $D^* / \delta x$ der charakteristischen Auflösung R^* . Hierbei entspricht D^* dem charakteristischen Branddurchmesser und δx der Größe einer Gitterzelle. Der charakteristische Branddurchmesser ist mit

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (5.16)$$

gegeben. Die Größe \dot{Q} ist die gesamte Wärmefreisetzungsrates (HRR) des Brandes in der Einheit kW. In der Formel entspricht ρ_∞ der Dichte von Luft in kg/m³, $c_{p\infty}$ der spezifische Wärmekapazität von Luft in kJ/(kg K), T_∞ der Temperatur der Umgebung in K und g der Erdbeschleunigung in m/s².

Wenn sich die HRR im Laufe der Zeit ändert, sollte die entsprechende Änderung bei der Auflösung berücksichtigt werden und hierbei nach Möglichkeit der maßgebende Zeitraum für die zu untersuchende Fragestellung Beachtung finden. Die charakteristische Auflösung $R^* = D^* / \delta x$ entspricht der Anzahl der Gitterzellen, die den charakteristischen (nicht notwendigerweise den physikalischen) Durchmesser des Brandes überspannen. Je mehr Zellen den Brand(herd) überspannen, desto besser ist die Auflösung der Berechnung. Es ist besser die Qualität des Gitters in Bezug auf diesen dimensionslosen Parameter zu bewerten, als eine absolute Gitterzellengröße festzulegen. Zum Beispiel kann eine Zellgröße von 10 cm "angemessen" sein, um die Ausbreitung von Rauch und Wärme durch ein Gebäude von einem Brand mit hoher Wärmefreisetzungsrates zu bewerten, aber möglicherweise nicht geeignet, um eine sehr kleine, schwelende Brandquelle zu untersuchen [5.21].

In [5.87] wird eine Sensitivitätsstudie zur Gitterweite mit drei verschiedenen CFD-Modellen für die Berechnung von Temperaturen und optischer Dichten in einem Atrium (mit einem angrenzenden Brandraum) durchgeführt. Es zeigte sich in den meisten Fällen, dass eine charakteristische Auflösung von $R^* = 4$ für einen Brand mit 1 MW Leistung als unterste Grenze der Auflösung vorliegen sollte, um die Abhängigkeit der berechneten Größen von der Gitterauflösung im Wesentlichen auszuschließen. Die Untersuchungen zeigen insbesondere, dass sich

die Art der Konvergenz innerhalb der Modelle unterscheidet und nicht universell beantwortet werden kann, da z. B. unterschiedliche Submodelle u. a. zur Berücksichtigung der Turbulenz eingesetzt werden.

Grundsätzlich ist jedoch zu beachten, dass eine charakteristische Auflösung bei komplexen Gebäudestrukturen nur als Richtwert herangezogen werden kann. Die Verbrennungsmodellierung ist in nicht unerheblichen Maße von der Zuluft- und Ablufführung abhängig. Da die charakteristische Auflösung sich nur auf die zugrunde gelegte Wärmefreisetzungsrates bezieht, wird eine zu grobe Auflösung der Zu- und Ablufflächen nicht berücksichtigt.

5.6.3 Wahl des Zeitschrittes

Die Wahl des Zeitschrittes hat Auswirkung auf die Diskretisierung der zugrunde liegenden Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie und somit auf die Stabilität der numerischen Lösungsverfahren. Wird der Zeitschritt für die Berechnung zu groß gewählt, kann dies dazu führen, dass die physikalischen Gleichungen nicht korrekt gelöst werden.

Als Stabilitätskriterium für die Wahl eines geeigneten Zeitschrittes wird bei CFD-Modelle häufig die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL-Zahl) herangezogen:

$$c = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (5.17)$$

mit

c	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl [-],
u	Strömungsgeschwindigkeit [m/s],
Δt	diskreter Zeitschritt [s],
Δx	räumlicher Diskretisierungsschritt [m].

Die CFL-Zahl gibt somit an, um wie weit sich eine betrachtete Größe pro Zeitschritt innerhalb des Berechnungsgebietes fortbewegt und ob es innerhalb des Zeitschrittes zu keinen Überschneidungen bei der Lösung der Transportgleichungen kommt. Verallgemeinert lässt sich aussagen, dass bei einer CFL-Zahl $c < 1$ eine stabile Berechnung durchgeführt werden kann. Die numerischen Hintergründe können [5.94] entnommen werden.

Da die Strömungsgeschwindigkeiten sich in Abhängigkeit des Brandverlaufes im Vergleich zum Startwert erhöhen können, ist ein ausreichend geringer Zeitschritt zu wählen oder ein Modell zu wählen, welches den Zeitschritt dynamisch wählt, sodass die CFL-Bedingung während der gesamten Berechnungsdauer eingehalten wird.

5.6.4 Hintergrundströmung

In Bauwerken, in denen mit einer horizontal gerichteten Hintergrundströmung zu rechnen ist, kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich ein achssymmetrischer Rauchgas-Plume ausbildet. In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit der Hintergrundströmung wird die Rauchgassäule in Richtung des Geschwindigkeitsvektors abgelenkt (Bild 5.14). In diesem

Fall ist eine gleichmäßige Schichtung der Rauchgase nicht mehr gegeben, sodass der Einsatz von Zonenmodellen in diesen Fällen nicht geeignet ist.

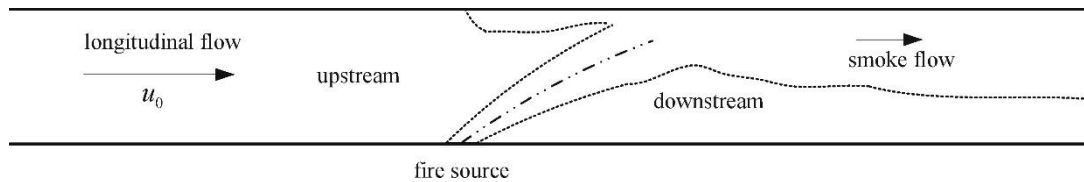


Bild 5.14 Rauchausbreitung bei horizontaler Hintergrundströmung [5.95]

Überschreiten die Strömungsgeschwindigkeiten der Hintergrundströmung einen kritischen Wert v_{krit} , kommt es zu einer Verrauchung bis auf das Bodenniveau. Bei dieser kritischen Strömungsgeschwindigkeit handelt es sich nicht um einen konstanten Wert. Vielmehr wird er u. a. durch die Wärmefreisetzung des Brandes beeinflusst. Neben dem Einsatz von CFD-Modellen existieren für die Ermittlung der kritischen Strömungsgeschwindigkeit auch empirische Korrelationen [5.95].

Der Einfluss von Hintergrundströmungen ist insbesondere bei unterirdischen Bauwerken wie Tunneln und unterirdischen Infrastrukturanlagen zu berücksichtigen. Messungen innerhalb einer U-Bahn-Station [5.96] haben gezeigt, dass diese Hintergrundströmungen Geschwindigkeiten von bis zu 0,6 m/s aufweisen können. Insbesondere in frühen Brandphasen kann die Hintergrundströmung negative Auswirkungen auf die Verrauchung angrenzenden Bereiche haben.

5.6.5 Berücksichtigung von Wind

Die Berücksichtigung von Windströmungen im Rahmen von Brand- bzw. Entrauchungssimulationen ist in einigen Fällen angezeigt. Hierzu werden im Kapitel 4.2.8.2 „Berücksichtigung von Wind- und Luftströmungen bei Brandsimulationen“ Festlegungen gemacht. In diesem Kapitel sollen allgemeine Aussagen für die CFD-Modellierung bei der Berücksichtigung von Wind erfolgen.

Insbesondere bei der Modellierung von Wald- und Flächenbränden ist die Berücksichtigung des Windes essentiell, aber auch zur Bewertung der Wirksamkeit von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen kann die Berücksichtigung des Windes von Interesse sein. Grundsätzlich sind CFD-Modelle sehr gut geeignet um die Einwirkungen des Windes auf die Brand- und Rauchausbreitung modellieren zu können, da im Windingenieurwesen und in der Meteorologie diese Modelle vielfältig Anwendung finden. Bei der Berücksichtigung des Windes ist jedoch zu beachten, dass diese Strömungen im Vergleich zu den brandinduzierten Strömungen in anderen räumlichen Skalen auftreten [5.97]. Darüber hinaus ist zu beachten, dass benachbarte Gebäude das Strömungsfeld beeinflussen und daher nicht unberücksichtigt bleiben dürfen. Aus diesen Gründen folgt, dass zur Berücksichtigung des Windes ein im Verhältnis zum Zielgebäude deutlich größeres Berechnungsgebiet zu wählen ist. Bild 5.15 zeigt eine Empfehlung für die Größe des Berechnungsgebiets, die sich aus Richtlinien des Windingenieurwesens ergeben.

5 Modelle für die Brandsimulation

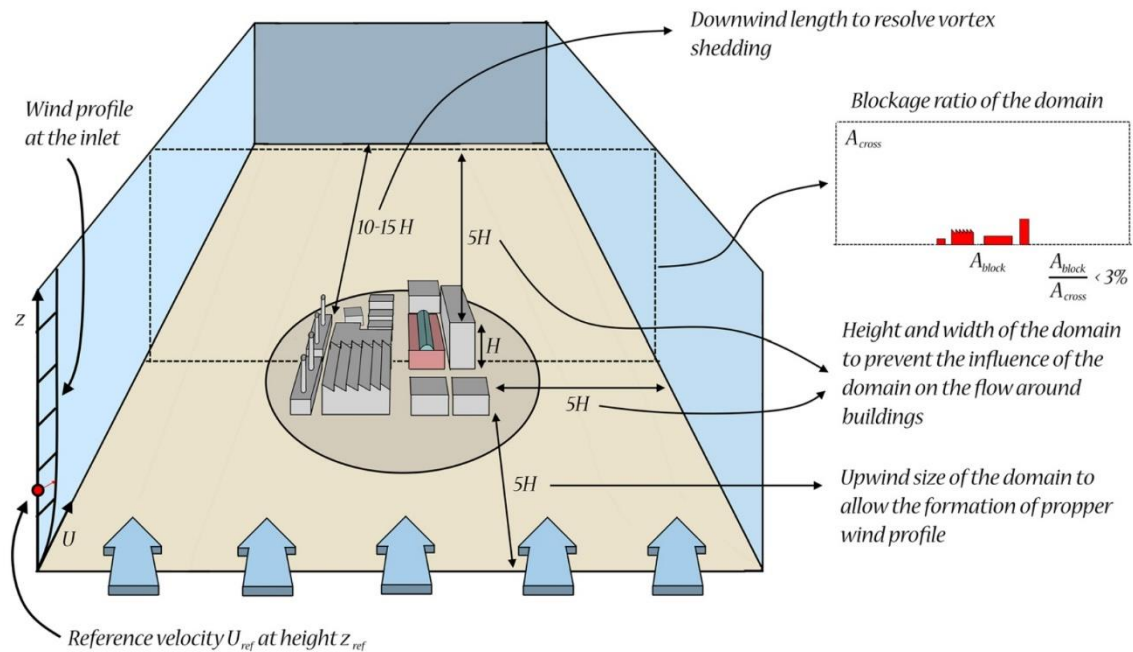


Bild 5.15 Größe Berechnungsgebiet bei der Berücksichtigung des Windes [5.98]

Ein zu kleines Berechnungsgebiet kann insbesondere an Gebäudekanten zu Strömungsabrissen führen, sodass auf der windabgewandten Seite keine windinduzierten Strömungen auftreten.

Des Weiteren ist zu beachten, dass im Bereich von Gebäudekanten sehr hohe lokale Strömungsgeschwindigkeiten auftreten können, die sich negativ auf die CFL-Zahl (vgl. Kapitel 5.6.3) auswirken, weswegen ein geringerer Zeitschritt zu wählen ist.

Wie auch bei Strömungen entlang horizontaler Bauteile, treten bei der Berücksichtigung des Windes keine über die Höhe konstanten Geschwindigkeiten auf. Das Geschwindigkeitsprofil des Windes ändert sich über die Höhe und lässt sich vereinfachend logarithmisch beschreiben (vgl. Bild 5.15). Für die Windgeschwindigkeit u in Abhängigkeit von der Höhe z gilt dann:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5.18)$$

mit

u^* Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s],

κ Kármánkonstante $\kappa \approx 0,4$,

z_0 dynamische Rauigkeitslänge [m].

Die Rauigkeitslänge berücksichtigt dabei die Oberflächenbeschaffenheit des Bodens und kann in tabellierter Form bspw. DIN EN 1991-1-4 entnommen werden. Referenzgeschwindigkeiten u_r von Messstationen werden im Allgemeinen in einer Höhe von $z_r = 10\text{m}$ über dem Boden aufgezeichnet. Liegen solche Messdaten vor, vereinfacht sich Gleichung (5.18) zu:

$$u(z) = u_r \frac{\ln(z / z_0)}{\ln(z_r / z_0)} \quad (5.19)$$

Bei der Anwendung des logarithmischen Windprofils ist zu beachten, dass diesem Windprofil die Annahme zu Grunde liegt, dass die Luft oberhalb des Bodens neutral geschichtet ist, d. h., dass die Lufttemperatur um 1 K pro 100 m abnimmt.

Soll das Temperaturprofil der Umgebungsluft berücksichtigt werden, z. B. Unterscheidung Sommer/Winter, ist zu beachten, dass in diesen Fällen das logarithmische Windprofil nicht anwendbar ist, da die Temperaturunterschiede der Luftmassen einen vertikalen Massenaustausch bewirken, der die Turbulenz begünstigt.

Zur Berücksichtigung der stabilen (Temperatur im Bodenbereich niedriger als in den darüber liegenden Schichten, Winterfall) oder labilen (Temperatur im Bodenbereich höher als in den darüber liegenden Schichten, Sommerfall) Schichtung der Luftmassen eignen sich Submodelle, die die Gesetzmäßigkeiten der Monin-Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie beachten [5.99].

5.6.6 Sprinkleranlagen

Sprinkleranlagen haben nach der automatischen Auslösung einen positiven Einfluss auf den Brandverlauf, der darauf basiert, dass das Wasser bei der Erwärmung und Verdampfung der Flamme und der Heißgasschicht Wärme entzieht.

Ein Ansatz um den Einfluss von Sprinkleranlagen bei CFD-Modellen zu berücksichtigen besteht darin, die Tropfen als Lagrange'sche Partikel abzubilden die sich durch das Berechnungsgebiet bewegen. Diese Partikel agieren dabei mit dem Strömungsfeld und den einzelnen Submodellen, weswegen dieses Verhalten in den einzelnen Submodellen berücksichtigt werden muss, dies ist u.a.:

- Impulserhaltung zwischen Partikel und Gasphase,
- Absorption und Streuung von Strahlung und
- die Reduktion des aus der Pyrolyse resultierenden Brennstoff-Massenstroms.

Um die Interaktion zwischen Wassertropfen und Strömung berechenbar zu machen, sind zudem eine Vielzahl von Vereinfachungen und zusätzlichen Submodellen notwendig. Dies betrifft u. a.:

- Zusammenfassung von mehreren Tropfen zu einem Partikel,
- Vernachlässigung der Stöße zwischen einzelnen Tropfen und
- Modellansätze für die Zerstäubung des Wasserstrahls unter Ansatz von Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Tropfendurchmesser.

Aktuelle Vergleichsrechnungen [5.100] anhand kleinskaliger Validierungsexperimente zeigen, dass die Interaktion zwischen Wassertropfen und einem Heißluftstrom derzeit nur ungenau wiedergegeben werden kann.

Es ist daher festzuhalten, dass die Simulation von Sprinkleranlagen derzeit noch Stand der Forschung ist und die Anwendung solcher Submodelle im Rahmen von brandschutztechnischen Nachweisen noch nicht zu empfehlen ist. Alternativ zur Modellierung mittels Lagrange'schen Partikel empfiehlt sich daher die Wirkung von Sprinkleranlagen durch Anpassung der Wärmefreisetzungsrate zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 4).

5.7 Literatur

- [5.1] YAMANA, T.; TANAKA, T.: Smoke Control in Large Scale Spaces. Part 1: Analytic Theories for Simple Smoke Control Problems. Fire Science and Technology Vol. 5 No. 1, 1985.
- [5.2] HANSELL, G. O.; MORGAN, H. P.: Design approaches for smoke control in atrium buildings, Building Research Establishment, Report BR 258, 1998.
- [5.3] DRYSDALE, D.: An Introduction to Fire Dynamics, Wiley-Interscience, New York, 1992.
- [5.4] KARLSSON, B.; QUINTIERE, J. G.: Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, 2000.
- [5.5] COX, G. (ED.): Combustion Fundamentals of Fire, Academic Press, 1995.
- [5.6] SCHNEIDER, U.; KERSKEN, M.; MAX, U.: Bewertung von Brandlasten in größeren Räumen. Teil II. Theoretische Untersuchungen. Forschungsbericht der AGB, Institut für Bautechnik, Berlin, Oktober 1991.
- [5.7] BEYLER, C. L.: Fire Plumes and Ceiling Jets. Fire Safety Journal, 11, 1986.
- [5.8] EVANS, D.: Ceiling Jet Flows. The SFPE Handbook of Fire protection Engineering. Section 2. Chapter 4, pp. 2.32 - 2.39.
- [5.9] EVANS, D.: Calculating Actuation Time in Compartments. Fire Safety Journal, 9, 1985.
- [5.10] ZUKOSKI, E. E.: Properties of Fire Plumes. Combustion Fundamentals of Fire, Cox, G. (ed.), Academic Press, 1995.
- [5.11] HOSSER, D.; DOBBERNACK, R.; SIEGFRIED, W.: Rauchabzug in ausgedehnten Räumen ohne und mit Sprinkleranlage – am Beispiel des Industriebaus. vfdb 4 / 97.
- [5.12] HOSSER, D.; SIEGFRIED, W.: Vergleich von Simulationsmodellen für die brandschutztechnischen Fragestellungen. 5. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis. Schriftenreihe des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 103, 1993. ISBN 3-89288-079-4
- [5.13] HESKESTAD, G.: Engineering Relations for Fire Plumes. Fire Safety Journal, 1984, pp. 25 - 32.
- [5.14] HESKESTAD, G.: Fire Plumes. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4. Edition, Section 2. Chapter 2, pp. 2.1 - 2.20.
- [5.15] HESKESTAD, G.; DELICHATSIOS, M. A.: The Initial Convective Flow in Fire: 17th International Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, 1978, pp. 1113 - 1123.

- [5.16] RADFORD, M. W.: An Investigation of the Effects of Sprinklers on Compartment Fires. Fire Engineering Research Report 96 / 6, School of Engineering, University of Canterbury. ISSN 1173-5996, 1996.
- [5.17] DAVIS, W. D.; NOTARIANNI, K. A.; TRAPPER, P. Z.: An Algorithm for Estimating the Plume Centerline Temperature in the Presence of a Hot Upper Layer. NISTIR 6178, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, June 1988.
- [5.18] DOBBERNACK, R.; HOSSER, D.; PALIGA, K.; BLUME, G.; WILL, J.: Experimentelle Grundlagen für die brandschutztechnische Auslegung von Gebäuden gegen Naturbrandbeanspruchung. Erschienen in: Forschungsarbeiten 1995 - 1999. Schriftenreihe des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 144, S. 265 - 266, 1999. ISBN 3-89288-123-5.
- [5.19] BLUME, G. W.: Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf der Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten. Dissertation TU Braunschweig, 2002.
- [5.20] MCGRATTAN, K. B.; BAUM, H. R.; REHM, R. G.; HAMIS, A.; FORNEY, G. P.; FLOYD, J. E.; HOSTIKKA, S.: Fire Dynamics Simulator (Version 2) – Technical Reference Guide. NISTIR 6783, National Institute of Standards and Technology, November 2001.
- [5.21] McGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S. et al.; Fire Dynamics Simulator User's Guide, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, NIST, National Institute of Standards and Technology, 2017.
- [5.22] SCHNEIDER, U.; MAX, U.; LEBEDA, CH.: Untersuchungen zur Bewertung von Brandsimulationsmodellen für die Festlegung ihrer Anwendungsgebiete und Grenzen. VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (2), 1997.
- [5.23] SAVILONIS, B.: Survey and Evaluation of Existing Smoke Movement Models. Fire Safety Journal 13 (1988) 87.
- [5.24] BEARD, A.: Evaluation of Fire Models Part I. Fire Safety Journal 19 (1992) 295.
- [5.25] NOVOZHILOV, V.: Computational fluid dynamics modeling of compartment fires, Progress in energy and Combustion Science 27 (2001) Issue 6.
- [5.26] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. NFPA, Quincy MA, Fifth Edition, 2016.
- [5.27] PEACOCK, R. D. ET AL.: Issues in Evaluation of Complex Fire Models. Fire Safety Journal 30 (1998) 103.
- [5.28] PATANKAR, S. V.; SPALDING D. B.: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows. Int. Journal of Heat and Mass Transfer 15 (1972) 1787.
- [5.29] SCHNEIDER, V.; LÖFFLER, S.; STEINERT, C.; WILK, E.: Application of the compartment fire CFD model KOBRA-3D in fire investigation. Proceedings Interflam '99, Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, 1999.
- [5.30] BAUM, H. R.; REHM, R. G.; BARNETT, P. D.; CORLEY, D. M.: Finite Difference Calculations of Buoyant Convection in an Enclosure, Siam J. Sci. Stat. 4 (1982) 117.

- [5.31] MCGRATTAN, K. B.; BAUM, H. R.; REHM, R. G.: Large Eddy Simulations of Smoke Movement. *Fire Safety Journal* 30 (1998) 161.
- [5.32] YAMANA, T.; TANAKA, T.: Smoke Control in Large Scale Spaces. Part 2: Smoke Control Experiments in a Large Scale Space. *Fire Science and Technology* Vol. 5 No. 1, 1985.
- [5.33] DUONG, D. Q.: The Accuracy of Computer Fire Models. Some Comparisons with Experimental Data from Australia. *Fire Safety Journal* 16 (1990).
- [5.34] SÖDERBOM, J.: Smoke Spread Experiments in Large Rooms. Experimental Results and Numerical Simulations. SP Report 1992:52, Swedish National Testing and Research Institute.
- [5.35] HE, Y.; BECK, V.: Smoke Spread Experiment in a Multi-Storey Building and Computer Modelling. *Fire Safety Journal* 28 (1997).
- [5.36] SCHNEIDER, U. ET AL.: Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz. 3. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Kontakt und Studium, Band 531, Expert Verlag, Renningen, 2004. ISBN 3-8169-2290-2.
- [5.37] SCHNEIDER, U.: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz. 3. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 2004. ISBN 3-8041-4189-7.
- [5.38] SCHNEIDER, U., LEBEDA, C.: Baulicher Brandschutz, Kohlhammer Verlag GmbH, Stuttgart, 2000. ISBN 3-17-015266-1.
- [5.39] HESKESTAD, G.: Fire Plumes. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. NFPA, Quincy, MA, 1995.
- [5.40] ZUKOSKI, E. E.: Properties of Fire Plumes in: Cox, G. (Ed.): *Combustion Fundamental of Fires*, Academic Press, London, 1995.
- [5.41] DITTES, W.: Methoden zur Darstellung der Luftströmungen in Fabrikhallen und Regeln für eine optimierte Lüftung. Dissertation Universität Stuttgart, 1996.
- [5.42] BIEGERT, B.: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Luftbewegung an wärmeabgebenden Körpern, Universität Stuttgart, IKE, Abt. Heizung, Lüftung, Klimatechnik, HLK 7D-205, 1990 (unveröffentlichte Studienarbeit).
- [5.43] WILK, E.; KOTTHOFF, I.: Modellversuche zur Lösung brand- und rauchschutztechnischer Probleme. *vfdb-Zeitschrift* 1 / 2001.
- [5.44] STEINERT, C.: Skalierung von Bränden – Teil 2: Physikalisches Modell. Brand- und Rauchversuche im originalen und verkleinerten Maßstab. *vfdb-Zeitschrift* 3 / 2002, S. 108 - 121.
- [5.45] PLATE, E. J. (Ed.): *Engineering Meteorology*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [5.46] GERHARDT, H. J.: Physikalische Modellierung der Rauchableitung unter besonderer Beachtung des Windeinflusses. Braunschweiger Brandschutztag '01. 9. Fachseminar Brandschutz Forschung und Praxis. 1. und 2. Oktober 2001 in Braunschweig, Heft 158, S. 251 - 266.

- [5.47] WtG-Merkblatt. Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, 1996.
- [5.48] Grundsätze für Rauchversuche in Gebäuden. Technischer Bericht der vfdb. vfdb-Zeitschrift, Verlag W. Kohlhammer (Hrsg.), Heft 3 / 2001, S. 150 - 152.
- [5.49] VDI Richtlinie 6019, Blatt 1, VDI, Mai 2006.
- [5.50] MÜLLEJANS, H.: Über die Bedingungen von Modellversuchen in der Klimatechnik. Ki 8 / 73, Teil 6, S. 63 ff, 1973.
- [5.51] BACH, H.: Ähnlichkeitskriterien bei Raumströmungen. KI Luft- und Kältetechnik. 9, 1973, S. 69 – 75.
- [5.52] BREIN, D.: Rahmenbedingungen der bekannten Freistrah- bzw. Plume-Theorien. VdS-Fachtagung. Rauchausbreitung und Rauchfreihaltung. Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (8), Juni 2003.
- [5.53] SEEGER, P. G.: Über Brandversuche in der Brandschutztechnik, vfdb Heft 1 und 2, 1970.
- [5.54] VDI Richtlinie 6019, Blatt 2, VDI, Juli 2009.
- [5.55] THOMAS, P. H., HINKLEY, P. L. et al: Investigations into the flow of hot gases in roof venting, Fire Research Technical Paper No. 7, Fire Research Station, 1963.
- [5.56] HINKLEY, P. L.: Rates of production of hot gases in roof venting experiments, Fire Safety Journal, 10 (1986).
- [5.57] DEMBSEY, N. A., PAGNI, P. J., WILLIAMSON, R. B.: Compartment fire near-field measurements, Fire Safety Journal, 24 (1995).
- [5.58] MCCAFFREY, B. J.: Momentum implications for buoyant diffusion flames, Combustion and Flame, 52 (1983).
- [5.59] CHOW, W. K.: On the Use of Time Constants for Specifying the Smoke Filling Process in Atrium Halls. Fire Safety Journal 28 (1997), p. 165-177;1997.
- [5.60] STEINERT, C.: Die Zeitkonstanten nach W.K. Chow - ein Beitrag zur Beurteilung der Verrauchung von Hallen im Brandfall. vfdb-Zeitschrift 3 / 1999, S. 120 - 124.
- [5.61] SCHNEIDER, U.; SEIFERT, U.: Aspekte der experimentellen Brandmodellierung, vfdb-Zeitschrift 2/2003, S. 43-58. 2003.
- [5.62] DETZER, R.: Physikalische Modelle als Grundlage für die Dimensionierung der Rauchableitung. Tagungsband der Braunschweiger Brandschutztage 03. 30.9.+1.10.2003 in Braunschweig, Heft 168, 2003.
- [5.63] STEINERT, C.: Skalierung von Bränden - Teil 1: Quellterme. vfdb-Zeitschrift 3 / 1999, S. 125 - 130.
- [5.64] SEIFERT, U.; STEIN, J.: Rauchversuche in Gebäuden. vfdb-Zeitschrift 3 / 2001.
- [5.65] DALHOFF, W.; GERHARDT, H. J. et al: Rauch- und Wärmeabzugsgeräte mit dem Windkanal. vfdb-Zeitschrift 4 / 77; 1977.

- [5.66] RJABOW, I.: Das Studium von Bränden in Modellen. UB Wissenschaftlich-technische Beilage 1/1967.
- [5.67] GERHARDT, H. J.; KONRATH, B.: Maschinelle Rauchableitung in besonderen Bauarten. vfdb-Zeitschrift 4 / 2004.
- [5.68] GERHARDT, H. J.: Anmerkungen zur Ähnlichkeit von Modellversuchen bei der Rauchableitung. vfdb-Zeitschrift 2 / 2002.
- [5.69] SCHNEIDER, V.: Mathematical and physical modelling of smoke spread in atria-type experimental set-ups, Proceedings Interflam2007, Fire Science & Engineering Conference, Royal Holloway University of London, 2007.
- [5.70] SCHLEICH, J.-B., FRANSSSEN, J.-M., TWILT, L., ET AL.: Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in large compartments, Final Report EUR 18868, Simulation of the fire tests of the "Parc des Expositions, Paris", 1999.
- [5.71] SHEPPARD, D. T.: Fire Environment Tests under flat ceilings, Test Report, Underwriters Laboratories, Society of Fire Protection Engineers, 1997.
- [5.72] ISO/TS 13447:2013: Fire safety engineering -- Guidance for use of fire zone models, ISO International Organization for Standardization, 2013.
- [5.73] DIN 18009-1: Brandschutzingenieurwesen – Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag Berlin, 2016.
- [5.74] GVZ-MERKBLATT: Leitfaden für die Planung, Ausführung und Abnahme von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA), Gebäudeversicherung Kanton Zürich, https://www.gvz.ch/_file/245/131119-leitfaden-rwa.pdf, Oktober 2013.
- [5.75] PEACOCK, R. D. et al : CFAST-Consolidated Model of Fire and Smoke Transport, (Version 7) Volume 1: Technical Reference Guide, NIST Technical Note 1889v1, 2019.
- [5.76] McGRATTAN, K.; McDERMOTT, R.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K.: Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 3: Validation, National Institute of Standards and Technology, NIST, Special Publication 1018-3, 2016.
- [5.77] PEACOCK, R. D.; RENEKE, P. A.; DAVIS, W. D.; JONES, W. W.: "Quantifying fire model evaluation using functional analysis", Fire Safety Journal 33 (1999), p. 167-184, 1999.
- [5.78] ISO/DIS16730: Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods, FINAL DRAFT, ISO 2008.
- [5.79] ASTM E1355 – 11: Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models, American Society for Testing and Materials ASTM 2011.
- [5.80] RIGOLLET, L.; ROEWEEKAMP, M.: Collaboration on fire code benchmark activities around the international fire research program PRISME, Seminar 2 EUROSAFE 2009.
- [5.81] AUDOUIN, L. et al.: Quantifying differences between computational results and measurements in the case of a large-scale well-confined fire scenario, IRSN, Nuclear Engineering and Design, Nuclear Engineering and Design 241 (2011) 18–31, 2011.

- [5.82] NUREG 1824-2: Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 2: Experimental Uncertainty, NUREG-1824 EPRI 1011999, Final Report, May 2007, Table 6-8.
- [5.83] RIESE, O., SIEMON, M.: Untersuchung der Prognosefähigkeit von deterministischen Brandsimulationsmodellen, Anwendung PRISME DOOR, Bauphysik 36 (2014), Heft 4, Ernst & Sohn Verlag 2014.
- [5.84] McGRATTAN, K.; FORNEY, G.: Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical Reference Guide, National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 1018, September 2004.
- [5.85] McGRATTAN, K.; McDERMOTT, R.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.: Fire Dynamics Simulator, Version 5, User's Guide, National Institute of Standards and Technology, NIST, Special Publication 1019-5, 2010.
- [5.86] McDERMOTT, R.; FORNEY, G. P.; FLOYD, J.; McGRATTAN, K.; MELL, W. E.: Fire Dynamics Simulator Version 6: Complex Geometry, Embedded Meshes, and Quality Assessment, National Institute of Standards and Technology, NIST, 2010.
- [5.87] RIESE, O.; KLIPPEL, A.; SCHNEIDER, V.; STOCK, B.: Einfluss der Gitterweite auf die Ergebnisse von Brandsimulationsmodellen Anwendung: Atrium, Bauphysik, Heft 2, Ernst & Sohn Verlag, April 2019.
- [5.88] MÜNCH, M., KLEIN, R.: Anforderungen an numerische Berechnungen der Brand- und Rauchausbreitung im Vorbeugenden Brandschutz, vfdb 3/2008.
- [5.89] SCHLESINGER, S.: Terminology for Model Credibility. Simulation, 32 (3): 103-104, 1979.
- [5.90] KILIAN, S.; ZEHFUß, J.: Ansätze für ein nachhaltiges Qualitätsmanagement bei der Entwicklung von Brandsimulationsprogrammen, vfdb 2/2019.
- [5.91] YEOH, G.H., YUEN, K.K.: Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering – Theory, Modelling and Practice, Butterworth-Heinemann, 2009.
- [5.92] MERCI, B., BEJI, T.: Fluid Mechanics Aspects of Fire and Smoke Dynamics in Enclosures, CRC Press, 2016.
- [5.93] EPPLE, B., LEITHNER, R., LINZER, W., WALTER, H.: Simulation von Kraftwerken und Feuerungen, Springer-Verlag/Wien, 2012.
- [5.94] HANKE-BOURGEOIS, M.: Grundlagen der Numerischen Mathematik und des Wissenschaftlichen Rechnens, Vieweg-Teubner, 3. aktualisierte Auflage, 2009
- [5.95] LI, Y.Z., INGASON, H.: Discussions on critical velocity and critical Froude number for smoke control in tunnels with longitudinal ventilation Fire Safety Journal 99 (2018) page 22-26, 2018.
- [5.96] BRÜNE, M., PFLITSCH, A., GOMELL, A.: Temperatures and natural background air-flow in subway systems - an influence factor for smoke propagation in the case of a subway fire, Tagungsband 5th Symposium Structural Fire Engineering – TU Braunschweig, 2018.

- [5.97] WEGRZYNSKI, W., LIPECKI: Wind and Fire Coupled Modelling – Part I: Literature Review, *Fire Technology*, 54, 1405 – 1442, 2018.
- [5.98] WEGRZYNSKI, W., LIPECKI, T., KRAJEWSKI, G.: Wind and Fire Coupled Modelling – Part II: Good Practice Guidelines, *Fire Technology*, 54, 1443 – 1485, 2018.
- [5.99] GASCH, R., TWELE, J.: Der Wind, in *Windkraftanlagen – Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*, SpringerVieweg, 2005.
- [5.100] BEJI, T., EBRAHIMZADEH, S. MARAGKOS, G., MERCI, B.: Numerical Modelling of the Interaction Between Water SPRAYS and Hot Air Jets – Part II: Two-Phase Flow Simulations, *Fire Safety Journal* 96 (2018), page 143 – 152, 2018.

ANHANG ZU KAPITEL 5

A5.1 Empirische Modellierung der Flammen und des Rauchgasplumes

A5.1.1 Allgemeines

In der Literatur wird eine Reihe von Brandquellen wissenschaftlich untersucht. Es wurde festgestellt, dass sich die Einmischung im Ähnlichkeitsbereich oberhalb der Flamme („far-field“) durch eine Potenzfunktion darstellen lässt, in der Potenzen der Aufstiegshöhe und des Wärmeeintrages in die Flamme den entstehenden Massenstrom bestimmen. Hierbei wird zunächst vorausgesetzt, dass es sich um eine kleine Wärmequelle (engl. „weak plume“) handelt und ein relativ zum Branddurchmesser entfernter gelegener Bereich („far-field“) betrachtet wird. Für flächig verteilte Brandlasten konnten diese Ansätze erweitert werden, indem man das Konzept des virtuellen Ursprungs einführte, der im Wesentlichen zu einer Korrektur der Aufstiegshöhe in der entsprechenden Gleichung für die punktförmige Brandquelle führte. Dieses Thema wird bei den Plumentemperaturen nochmals aufgegriffen. Da diese Korrektur von dem Branddurchmesser abhängt, wird dadurch die Abhängigkeit von der Brandfläche berücksichtigt [5.13], [5.14], [5.39].

Unter Annahme einer kreisförmigen oder quadratischen Wärmequelle ergibt sich z. B. nach Zukoski:

$$\dot{m}_{\text{pl}} = 0,071 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot z^{5/3} \quad (\text{A5.1})$$

mit

\dot{m}_{pl}	Massenstrom des Plumes in der Höhe z [kg/s],
\dot{Q}_c	konvektive Wärmeleistung in kW,
z	Höhe des Plumes in m oberhalb der Brandherdgrundfläche.

Diese Gleichung lässt sich aus den allgemeinen Strömungsgleichungen durch folgende vereinfachende Annahmen ableiten:

- Es handelt sich um eine Punktquelle.
- Die Dichteunterschiede im Plume sind klein gegenüber der Umgebung.
- Die Einmischung von Umgebungsluft in den Plume ist proportional zu der lokalen vertikalen Geschwindigkeit im Plume.
- Die Profile der vertikalen Geschwindigkeitskomponente und der Auftriebskraft sind auf jeder Sektion der vertikalen Achse ähnlich.

Daraus ergeben sich Gleichungen, deren Lösungen Angaben für den Plumeradius, die vertikale Geschwindigkeit und die Dichte in Abhängigkeit von der Höhe z enthalten. Aus der Gleichung für die Dichte lässt sich durch einfache Umformung eine Beziehung für die Temperatur ableiten. Die Gleichung für den Plumemassenstrom setzt sich aus diesen Gleichungen zusammen. Daher ist eine Prüfung dieser Gleichung indirekt über eine Messung der Geschwindigkeit

und der Temperatur möglich. Daneben existiert noch die Möglichkeit einer direkten messtechnischen Erfassung des Plumemassenstroms.

Bei der Überprüfung der dargestellten Zusammenhänge anhand von Messwerten macht man sich insbesondere zu Nutze, dass Geschwindigkeit und Temperatur über eine zusammengesetzte Variable ($z/Q^{2/5}$) aufgetragen werden können. Dabei sind zwei Aspekte von Interesse, nämlich einmal die Form der daraus entstehenden Kurven (siehe Bild A 5.1) und die Tatsache, dass nicht eine der Variablen allein diese Form bestimmt, sondern die Kombination. Die Verifizierung der Gültigkeit setzt daher eine entsprechende Variation dieser kombinierten Variablen voraus.

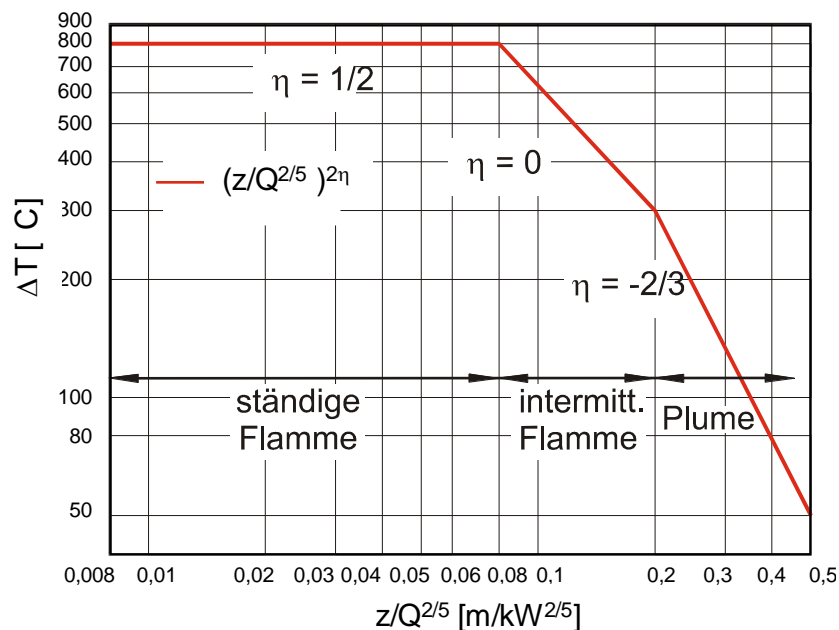


Bild A 5.1 Temperaturentwicklung über der Zentralachse der Flamme und des Rauchgasplumes

Anhand der Ergebnisse dieser Vergleiche zwischen den getroffenen Annahmen und den Experimenten wurde deutlich, dass es unterschiedliche Bereiche gibt und die obige Gleichung (A5.1) nur oberhalb der Flamme („far-field“) gültig ist. Um entsprechende Ansätze auch für den Flammenbereich zu erhalten, wurden, basierend auf theoretischen Überlegungen und zusätzlicher experimenteller Ergebnisse, Korrekturen vorgenommen.

Wie an der Formel für die mittlere Flammenhöhe (siehe Gleichung A5.13) erkennbar, ist diese eine Funktion der Wärmefreisetzungsrate und des Durchmessers der Brandquelle. Im Flammenbereich („near-field“) ist der Durchmesser der Brandquelle (Einfluss der Brandfläche) nicht vernachlässigbar und stellt eine zusätzliche Längenskala dar, die auch Auswirkungen auf den Plumemassenstrom haben muss. Deshalb enthalten die oben bereits angesprochenen Korrekturen, wie sie beispielsweise die Ansätze von Heskestad [5.13], [5.14], [5.39] enthalten, auch den Durchmesser D der Brandfläche. Da die Wärmefreisetzungsrate mit der Höhe innerhalb der Flamme zunimmt, kann der Einfluss des Parameters D am Fuß der Flamme sehr groß sein. Dies ist der Ausgangspunkt für den Ansatz von Thomas und Hinkley [5.55], die ein Plume-Modell für sogenannte „large fires“ entwickelten, welches lediglich vom Umfang U des Brandherds ($U = \pi \times D$) abhängt. Ursprünglich wurde der Anwendungsbereich dieser Formel auf Höhen von $z < 1,77 D$ begrenzt. Später konnte Hinkley zeigen [5.56], dass auch für $z < 8 D$

eine passable Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen vorliegt, obgleich eine theoretische Untermauerung bisher nicht gelang. Diese Übereinstimmung ist jedoch auch von einer exakten Bestimmung des Brandumfangs abhängig. Im Gegensatz dazu konnte eine Untersuchung von Dembsey et al [5.57], welche Daten aus neun verschiedenen Versuchsreihen verglich, zeigen, dass dieser Ansatz gerade im Flammenbereich, einer Modifikation bedarf um Übereinstimmung mit den Messwerten zu erzielen und der Ansatz von McCaffrey [5.58] die bessere Übereinstimmung erbringt.

Die oben bereits erwähnte Überprüfung anhand von Temperatur und Geschwindigkeitsmessungen (siehe auch Bild A 5.2) führt zu folgender Unterteilung der Bereiche oberhalb einer brennenden Oberfläche, welche in den Ansätzen von McCaffrey berücksichtigt sind:

- die Flammenzone (Nahfeld des Brandes), sie besteht aus einer ständigen Flamme und einem beschleunigten Strom brennender Gase,
- die intermittierende Flammenzone ist der Bereich vorübergehender Flammenbildung mit nahezu konstanter Strömungsgeschwindigkeit,
- der Rauchgasplume ist ein Bereich mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur bei zunehmender Höhe.

In Bild A 5.2 ist die Ausbildung der Flamme und des Plumes schematisch dargestellt. In der Praxis wird der Brandbereich entweder als Punktquelle aufgefasst, oder dem Rauchgasplume wird ein sogenannter virtueller Quellpunkt zugeordnet. Der Winkel zwischen Plume-Achse und Plume-Kegel beträgt ungefähr 15°. Es ist zu beachten, dass die Flammenform nichts über den Umfang der oben strömenden Rauchgase aussagt.

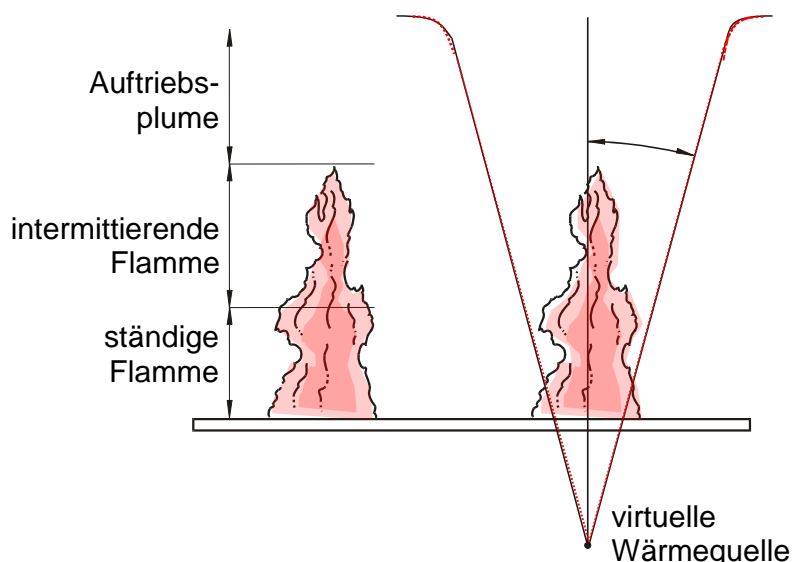


Bild A 5.2 Schematische Darstellung der Ausbildung von Flamme und Plume nach [5.3], [5.37]

Die Schwierigkeiten bei der Beurteilung der einzelnen Modelle bestehen darin, dass der aufwärts gerichtete Massenstrom entweder nur indirekt gemessen werden kann, bzw. die Erfassung des Volumenstroms gerade bei großen Brandherden sehr schwierig ist und fast immer von anderen Einflussgrößen verfälscht wird. Die Messergebnisse unterliegen, neben üblichen

Messfehlern, häufig auch dem Einfluss turbulenter Strömungen, welche die Plume-Strömung überlagern.

Zur Berechnung der Rauchgasmengen des Plumes (Rauchgassäule) kommen deshalb verschiedene Plumeformeln zur Anwendung, die sich nach Lage des Brandherds (z. B. an der Wand), geometrischer Abmessung oder der Struktur des Brandherds oder der Rauchgasquelle unterscheiden. Eine diesbezügliche Zusammenstellung findet sich in British Standard BSI DD 240, Part 1, 1997: Fire Safety Engineering in Buildings, bzw. Part 2, Commentary on the equations given in Part 1. Eine deutschsprachige Zusammenfassung dieser Erläuterungen findet sich bei Brein [5.52], dessen Zusammenstellung auch Anwendungsgrenzen und Fehlerbandbreiten diskutiert. Die dort enthaltene Tabelle über Anwendungsgrenzen ist im Kapitelanhang (Tabelle A5.1) angefügt. Hinweise zur Anwendung der jeweiligen Gleichungen können der weiterführenden Literatur entnommen werden, z. B. [5.10], [5.13], [5.14], [5.16].

A5.1.2 Ceiling Jet

Der Terminus Ceiling Jet beschreibt die relativ schnelle Rauchgasströmung in einer flachen Schicht unterhalb der Decke eines Brandraums, welche von der Auftriebskraft der Brandgase angetrieben wird. Ausgehend vom Auftreffpunkt an der Decke oberhalb des Brandherds ergibt sich eine radiale Ausbreitung der Rauchgase, bis zum Erreichen der Umfassungswände oder ähnlicher Begrenzungen. Dieses Ausbreitungsbild bleibt ungestört, solange sich keine definierte Rauchgasschicht ausbildet. In der Regel ist dies jedoch nur in der Anfangsphase eines Brandes der Fall. In diesen Zeitraum fallen jedoch typischerweise die Auslösezeitpunkte von Sprinklern, deren Auslöseelemente durch die sie umströmenden Rauchgase erwärmt werden.

Für die Berechnung der Ceiling Jet-Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten im Hinblick auf die Bestimmung der Auslösezeiten von Sprinklern und Wärmemeldern lassen sich die Gleichungen (A5.2) bis (A5.5) verwenden [5.7] – [5.9].

$$v_{\text{jet,t}} = 0,95 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{z} \right)^{1/3} \quad \text{für} \quad \frac{r}{z} \leq 0,15 \quad (\text{A5.2})$$

$$v_{\text{jet,t}} = 0,2 \cdot \frac{\dot{Q}^{1/3} \cdot z^{1/2}}{r^{5/6}} \quad \text{für} \quad \frac{r}{z} > 0,15 \quad (\text{A5.3})$$

$$T_{\text{jet,t}} = T_{\infty} + \frac{16,9 \cdot \dot{Q}^{2/3}}{z^{5/3}} \quad \text{für} \quad \frac{r}{z} \leq 0,18 \quad (\text{A5.4})$$

$$T_{\text{jet,t}} = T_{\infty} + \frac{5,38}{z} \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{r} \right)^{2/3} \quad \text{für} \quad \frac{r}{z} > 0,18 \quad (\text{A5.5})$$

mit

- \dot{Q} Wärmefreisetzungsrate [kW],
- r Abstand des Sprinklers von der Plume-Achse [m],
- $T_{\text{jet,t}}$ Temperatur im Ceiling Jet zum Zeitpunkt t [°C],
- T_{∞} Temperatur der Umgebungsluft [°C],

$T_{D,t}$	Sprinklertemperatur zum Zeitpunkt t [°C],
$v_{jet,t}$	Gasgeschwindigkeit im Ceiling Jet [m/s],
z	Differenz zwischen Deckenhöhe und Brandherdhöhe [m].

Die darin enthaltenen Konstanten sind experimentell bestimmt und weisen in Abhängigkeit von den experimentellen Randbedingungen gewisse Schwankungen auf. Da die obigen Korrelationen zur Bestimmung der Auslösezeitpunkte von Sprinklerköpfen dienen, enthalten sie Zahlenwerte der Konstanten am unteren Ende des beobachtbaren Spektrums. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Zeitdauern bis zum Erreichen der Auslösetemperatur konservativ beurteilt werden.

Zur Ermittlung der zeitabhängigen Temperaturentwicklung an einem Sprinkler sind lediglich die zeitabhängigen Werte der Wärmefreisetzungsrate einzusetzen. Diese Werte können auf der Grundlage bekannter Experimente oder theoretischer Verläufe festgelegt werden. Aus den obigen Gleichungen erhält man dann orts- und zeitabhängige Werte für Geschwindigkeit und Temperatur. Dabei ist jedoch wesentlich, dass sich eine definierte Rauchgasschicht noch nicht ausgebildet hat, da dies zu veränderten Temperaturprofilen führt. Dies tritt insbesondere bei kleinen Räumen sehr schnell ein und ist entsprechend zu berücksichtigen. Wesentlich ist auch die Lage des Brandherds, da in der Nähe einer Wand oder Ecke die Einmischung von Umgebungsluft reduziert ist und somit eine verminderte Abkühlung über der Höhe auftritt [5.10]. Eine weitere Bedingung für die Anwendbarkeit stellt die relativ ungestörte radiale Ausbreitung dar. Ist diese durch stark ausgeprägte Unterzüge unterbrochen oder stellen sich aus anderen Gründen kanalartige Strömungen ein, so ist im Einzelfall zu entscheiden, welche Auswirkungen die veränderten Randbedingungen haben, u. U. stehen modifizierte Ansätze zur Verfügung, für die auf die angegebene Fachliteratur verwiesen wird.

Da die Umgebungstemperatur nicht unmittelbar von einem massebehafteten Sensor angenommen wird, sondern dieser erst auf die Auslösetemperatur erwärmt werden muss, hinkt dessen Temperatur der zeitlichen Entwicklung der Umgebungstemperatur etwas hinterher. Um diese Verzögerung zu berücksichtigen, können die nachstehenden Gleichungen verwendet werden [5.9].

$$T_{D,t+\Delta t} = (T_{jet,t+\Delta t} - T_{D,t}) \cdot (1 - e^{-1/\tau}) + (T_{jet,t+\Delta t} - T_{jet,t}) \cdot \tau \cdot \left(e^{-1/\tau} + \frac{1}{\tau} - 1 \right) \quad (A5.6)$$

$$\tau = \frac{RTI}{\sqrt{v_{jet,t}}} \quad (A5.7)$$

mit

RTI Response Time Index, Maß für die Ansprechempfindlichkeit des Sprinklers [(ms)^{0.5}],

$T_{jet,t+\Delta t}$ Temperatur im Ceiling Jet im nächsten Zeitschritt [°C].

Beispiele für die Anwendung der obigen Gleichungen sind z. B. in [5.11] gegeben.

A5.1.3 Plume-Temperaturen

Während durch die Berechnung der Temperaturen im Ceiling Jet Aussagen über das Auslöseverhalten von Sensorelementen oder Sprinklern gewonnen werden sollen, existieren noch weitere Anwendungsbereiche wie die lokale Erwärmung von Bauteilen. Die Vorhersage der thermischen Beanspruchung der Konstruktion ist bei kleinen Räumen mit nahezu homogenen Temperaturverhältnissen relativ einfach und mit einem Zonenmodell beschreibbar. Bei sehr großen und hohen Räumen sind die auftretenden Temperaturunterschiede jedoch beträchtlich. Dies gilt auch für Raumpunkte innerhalb der Rauchgasschicht. Am Beispiel eines Brandversuchs in einem Brandraum mit den Innenabmessungen 20,4 m x 7,2 m x 3,6 m und einer Ventilationsöffnung von 5,0 x 1,4 m soll dies veranschaulicht werden. Bei dem betreffenden Versuch wurden zwei Stapel Holzkippen von insgesamt ca. 1.000 kg als Brandlast verwendet. Der Brand wurde unter Vorgabe der gemessenen Abbrandrate mit dem Brandsimulationsmodell HARVARD VI nachgerechnet. Bild A5.3 zeigt den Vergleich der berechneten Temperaturzeitkurve mit den gemessenen Temperaturen in einer Höhe von 0,3 m über dem Boden und 0,3 m unter der Decke des Brandraumes, ca. 5 m entfernt vom Brandherd [5.12].

Die berechnete Rauchgastemperatur stimmt näherungsweise mit dem Mittelwert der Messwerte überein, der etwa in halber Raumhöhe anzutreffen ist. Unter der Decke liegen die gemessenen Temperaturen jedoch um bis zu 170 K höher. Die Bemessung von Bauteilen im Deckenbereich unter Ansatz der mit dem Zonenmodell berechneten mittleren Rauchgastemperatur läge demnach weit auf der unsicheren Seite. Ebenso bleiben Temperaturspitzen in der Nähe des Brandherdes, d. h. im Plumbereich, unberücksichtigt. Diese lokalen Temperaturmaxima sind durch Ansätze zur Berechnung von Plume-Temperaturen berechenbar, die auf der gleichen Grundlage beruhen wie die Plume- und Ceiling Jet-Modelle.

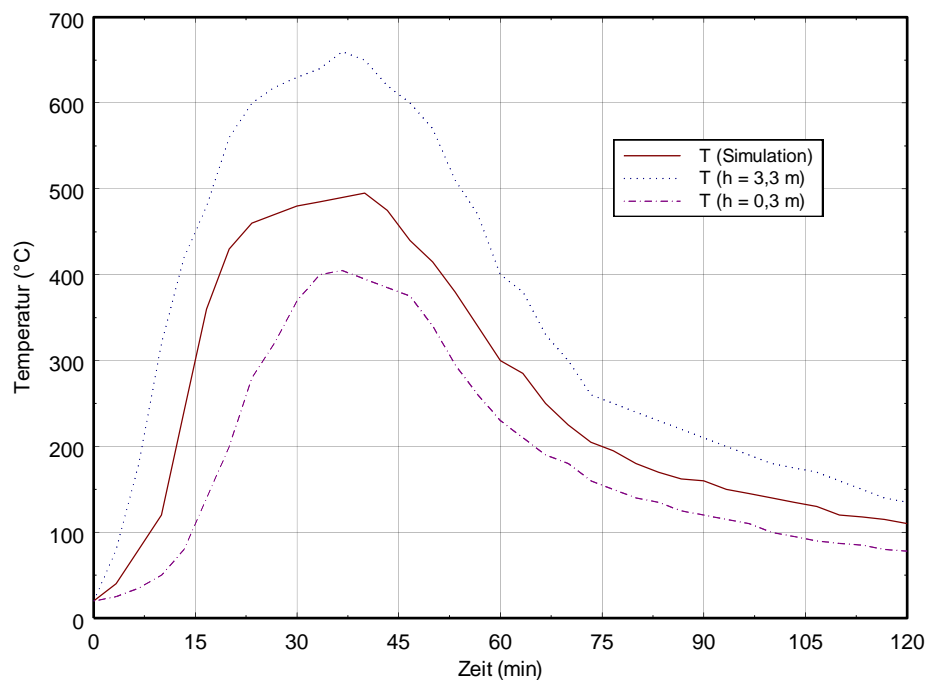


Bild A 5.3 Vergleich der gemessenen Temperaturen beim Brandversuch mit den Werten aus der Berechnung mit HARVARD VI

Zur Ableitung und Absicherung von Modellansätzen für die Berechnung von Plume-Temperaturen sind zahlreiche Arbeiten im internationalen Rahmen durchgeführt worden [5.13] - [5.16]. Neben den grundsätzlichen Einflussgrößen wie Wärmefreisetzungsrate und Abstand zum Brandherd wurde dabei auch der Einfluss der Brandfläche (bzw. die räumliche Struktur der Brandquelle), das Auftreten einer ausgeprägten Rauchgasschicht und die Zahlenwerte der auftretenden Konstanten untersucht und bestimmt. Im Folgenden werden zunächst Modellansätze vorgestellt, welche den Einfluss einer Rauchgasschicht nicht berücksichtigen und demnach nur für diesen Fall anwendbar sind, d. h. in der Anfangsphase oder im Freien.

Das Heskestad-Delichatsios Modell [5.15] (H-D-Modell) für die Berechnung der Temperaturerhöhung ΔT_p im Falle ohne Heißgasschicht lautet:

$$\Delta T_p = T_\infty (\dot{Q}^*)^{2/3} \cdot \left(0,188 + 0,313 \cdot \frac{r}{z} \right)^{-4/3} \quad (\text{A5.8})$$

$$\dot{Q}^* = \frac{(1 - \chi_r) \cdot \dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot g^{1/2} \cdot z^{5/2}} \quad (\text{A5.9})$$

mit

\dot{Q}	Wärmefreisetzungsrate des realen Brandherdes [kW],
ρ_∞	Dichte der Umgebungsluft [kg/m ³],
c_p	spez. Wärmekapazität der Kaltgasschicht [kJ/(kgK)],
T_∞	Temperatur der Umgebungsluft [K],
T_p	Plume-Temperatur [K],
g	Erdbeschleunigung [m/s ²],
χ_r	radiativer Anteil der Wärmefreisetzungsrate [-],
z	vertikaler Abstand von der Brandherdoberfläche zum Berechnungsort [m],
r	radialer Abstand zur Plume-Achse [m].

Dieser Modellansatz bietet den Vorteil einer gemeinsamen Gleichung für die Mittelachse ($r = 0$ m) und einem radialen Abstand r . Speziell für die Mittelachse mit $r = 0$ m ergibt sich:

$$\Delta T_p = 9,28 \cdot T_\infty (\dot{Q}^*)^{2/3} \quad (\text{A5.10})$$

Bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C (293 K) folgt daraus folgende einfache Formel für die Plume-Achse:

$$\Delta T_p = 25,5 \cdot \frac{\left((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q} \right)^{2/3}}{z^{5/3}} \quad (\text{A5.11})$$

$$T_p = T_\infty + \Delta T_p \quad (\text{A5.12})$$

Zur Umrechnung auf [°C] ist lediglich der Wert von 273 K zu subtrahieren.

Diese Art von Gleichungen sind streng genommen nur oberhalb der mittleren Flammenhöhe gültig und wenn sich der Plume frei ausbilden kann, d.h. nicht innerhalb einer Rauchgasschicht liegt. Nähert man sich im Abstand z dem Flammenbereich, steigen die berechneten Temperaturwerte i. A. stark an und können unrealistisch hohe Werte annehmen. Durch experimentelle Untersuchungen hat man festgestellt, dass innerhalb der Flamme ein Mittelwert von ca. 900 °C erreicht wird. Dieser Wert ist etwas überraschend, da er sehr deutlich unterhalb der adiabatischen Flammentemperatur liegt und er ist das Resultat der bei Diffusionsflammen auftretenden Turbulenz. Diese turbulenten Schwankungen in der Strömung führen zu Fluktuationen von ca. 38 % um den jeweiligen Temperaturmittelwert. Der Wert 900 °C stellt somit einen Mittelwert dar, der von großen Fluktuationen begleitet wird. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass dieser Wert durchaus auch vom Brennstoff abhängen kann. In Abhängigkeit von der Rußbildung und der Flammenstrahlung können auch deutlich höhere Werte auftreten. Dies gilt beispielsweise für brennbare Flüssigkeiten. In den meisten Fällen ist eine obere Schranke von 1.000 °C - 1.200 °C auf der sichereren Seite. Ansonsten ist in jedem Einzelfall zu prüfen, ob eine Temperaturobergrenze von 900 °C ausreicht. Hierfür sind experimentelle Ergebnisse heranzuziehen. Um zu prüfen, ob man sich dem Flammenbereich nähert, kann die mittlere Flammenhöhe berechnet werden [5.14], [5.16]:

$$Z_f = 0,235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \cdot D_f \quad (\text{A5.13})$$

mit

Z_f : mittlere Flammenhöhe [m]

D_f : Branddurchmesser [m]

Da auch die Flammen aufgrund der Abkühlungseffekte in der Regel keine einheitliche Temperatur aufweisen, sind Ansätze entwickelt worden, die diesen Teil des Plumes einer differenzierten Betrachtung unterziehen [5.14], [5.16]:

$$\Delta T_p = 78,4 \cdot \frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \quad \text{für} \quad 0,08 \cdot \dot{Q}^{2/5} \leq 0,20 \cdot \dot{Q}^{2/5} \quad (\text{A5.14})$$

$$\Delta T_p = 25,5 \cdot \frac{((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q})^{2/3}}{z^{5/3}} \quad \text{für} \quad 0,20 \cdot \dot{Q}^{2/5} \leq z \quad (\text{A5.15})$$

Der Ausdruck $0,08 \cdot \dot{Q}^{2/5}$ grenzt den Bereich ab, der direkt in den Flammen liegt. Unterhalb dieser Grenzhöhe wird die Flammentemperatur zugewiesen. Die Gültigkeit der obigen Gleichungen ist auf Bereiche beschränkt, in denen sich noch keine definierte Rauchgasschicht ausgebildet hat oder, gemessen an der Raumhöhe, diese noch von untergeordneter Bedeutung ist.

Ein weiterer Parameter ist durch den virtuellen Ursprung z_0 gegeben. Dieser virtuelle Ursprung ergibt sich aus der Betrachtung einer Punktquelle, die in Höhe der Brandlastoberfläche eine endliche Ausdehnung aufweist (siehe Bild A 5.1). Bei Berücksichtigung dieses Parameters wird in den entsprechenden Gleichungen (z. B. Plumemassenstrom oder Centerline -Temperatur) die Größe z durch $(z - z_0)$ ersetzt. Zur Bestimmung von z_0 existieren ebenfalls mehrere Ansätze, da sich die experimentell bestimmten Ergebnisse nach der Struktur der Brandlast unterscheiden. Die eindeutigsten Ergebnisse erhält man wiederum bei Lachenbränden, da hier

eine klar definierte horizontale Oberfläche vorhanden ist (eindeutige Höhenlage). Bei Holzkippen, Regal- oder Lageranordnungen mit horizontal und vertikal ausgerichteten Zwischenräumen findet ein nennenswerter Anteil der Verbrennung in den vorhandenen Zwischenräumen statt, sodass die Bestimmung von z_0 hier zu anderen Gleichungen und somit abweichenden Ergebnissen führt. Heskestad [5.14] empfiehlt hier die Anwendung einer speziellen Formel. Der Vergleich der verschiedenen Formeln zeigt, dass hierbei mit entsprechenden Fehlerbandbreiten zu rechnen ist.

Die wesentlichste Einschränkung der bisher vorgestellten Gleichungen zur Ermittlung der Centerline-Temperatur stellt jedoch die Überlagerung von lokaler Plumeströmung und Rauchgasschicht dar. Mit zunehmender Branddauer bildet sich eine Rauchgasschicht aus, wodurch der Plume ab dem Eindringen in diese Schicht keine kühle Umgebungsluft mehr einmischt, sondern eben Rauchgase mit erhöhter Temperatur. Dadurch wird die Abkühlung reduziert. Aufgrund dieser Zusammenhänge gelten die oben dargestellten Formeln nur im Freien oder in der Anfangsphase eines Brandes.

Im Fall einer Heißgasschicht, die sich im Verlauf des Brandes entwickelt hat, sind die obigen Gleichungen daher zu modifizieren. Nach Eintritt der Rauchgassäule (Plume) in die Heißgasschicht wird nicht mehr die Umgebungsluft mit relativ geringer Temperatur eingemischt, sondern die warmen oder heißen Rauchgase. In diesem Fall wird ein Ansatz für die Plume-Centerlinetemperatur verwendet, der diese veränderten Randbedingungen bei Eintritt in die Rauchgasschicht berücksichtigt. Das Grundkonzept dieses Ansatzes besteht darin, den realen Brandherd durch eine „virtuelle Wärmequelle“ zu ersetzen, die eine andere Wärmefreisetzungsrate und einen anderen Abstand zur Decke als der reale Brandherd hat.

Grundlage ist die Erhaltung des Enthalpiestroms an der Grenzfläche zwischen nahezu rauchgasfreier Schicht und Rauchgasschicht. Als zusätzliche Parameter werden daher die Rauchgastemperatur T_s , die Temperatur der Kaltgasschicht T_∞ und der Abstand zur Rauchgasschicht $z_{i,1}$ benötigt. Diese Werte sind mit Hilfe der Brandsimulationsrechnung zu bestimmen. Im Folgenden soll die Anwendung dieses Ansatzes [5.17] beschrieben werden.

Zunächst wird die Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} des realen Brandherdes in einen dimensionslosen Wert umgerechnet.

$$\dot{Q}_{i,1}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot g^{1/2} \cdot z_{i,1}^{5/2}} \quad (1.1)$$

mit

$\dot{Q}_{i,1}^*$: dimensionslose Wärmefreisetzungsrate des realen Brandherdes [-],

\dot{Q} : Wärmefreisetzungsrate des realen Brandherdes [kW],

ρ_∞ : Gasdichte der Kaltgasschicht [kg/m³],

c_p : spez. Wärmekapazität der Kaltgasschicht [kJ/(kgK)],

T_∞ : Temperatur der Kaltgasschicht [K],

g : Erdbeschleunigung [m/s²],

5 Modelle für die Brandsimulation

$z_{1,1}$: Distanz des realen Brandherdes zur Grenzfläche zwischen oberer und unterer Schicht [m].

Anschließend wird die dimensionslose Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{1,2}^*$ der „virtuellen Wärmequelle“ berechnet, welche die real vorhandene Wärmefreisetzungsrate ersetzt und innerhalb einer ebenfalls modifizierten Rauchgasschicht liegt.

$$\dot{Q}_{1,2}^* = \left[\frac{1 + C_T \cdot (\dot{Q}_{1,1}^*)^{2/3}}{C_T \cdot \xi} - \frac{1}{C_T} \right]^{3/2} \quad (\text{A5.17})$$

mit

$\dot{Q}_{1,2}^*$: dimensionslose Wärmefreisetzungsrate der „virtuellen Wärmequelle“ [-],

C_T : Konstante (9,115) [-],

ξ : Temperaturverhältnis von Rauch- und Kaltgasschicht (T_s/T_∞) [-].

Der Abstand $z_{1,2}$ der „virtuellen Wärmequelle“ zur Grenzfläche zwischen oberer heißer Rauchgasschicht und Kaltgasschicht ergibt sich zu:

$$z_{1,2} = z_{1,1} \cdot \left[\frac{\xi \cdot C_T \cdot \dot{Q}_{1,1}^*}{(\dot{Q}_{1,2}^*)^{1/3} \cdot \left[(\xi - 1) \cdot (\beta^2 + 1) + \xi \cdot C_T \cdot (\dot{Q}_{1,2}^*)^{2/3} \right]} \right]^{2/5} \quad (\text{A5.18})$$

mit

β^2 0,913 (Verhältnis von Temperatur zu Geschwindigkeit im Profil) [-]

Diese Größen werden für eine modifizierte Eingabe in die Centerline-Temperatur oder Ceiling Jet-Temperatur benutzt. Außerdem ergibt sich eine modifizierte Raumhöhe H_2 :

$$H_2 = H_1 - z_{1,1} + z_{1,2} \quad (\text{A5.19})$$

und

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{1,2}^* \cdot \rho_s \cdot c_p \cdot T_s \cdot g^{1/2} \cdot z_{1,2}^{5/2} \quad (\text{A5.20})$$

ρ_s und T_s sind die neuen Umgebungsbedingungen mit den Werten aus der Heißgasschicht, wobei gilt:

$$\rho_0 \cdot T_0 = \rho_s \cdot T_s = 353 \text{ kg} / (\text{m}^3\text{K}) = \text{const.} \quad (\text{A5.21})$$

Aus diesen Werten wird jetzt die Temperatur unter der Decke ($r = 0$) berechnet, in dem die neuen Werte in folgende Gleichung eingesetzt werden:

$$T_p = T_s + 25,5 \cdot \frac{\left((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q}_2 \right)^{2/3}}{H_2^{5/3}} \quad (\text{A5.22})$$

Zu der in der Heißgasschicht herrschenden Temperatur T_s wird die berechnete Temperaturerhöhung addiert und ergibt dann die Temperatur unter der Raumdecke über dem Brandherd.

Soll die Temperaturentwicklung in einem Abstand r von der Plume-Achse berechnet werden, so steht ein modifizierter Ansatz für die Ceiling Jet-Temperatur zur Verfügung [5.17].

$$\Delta T_{\text{jet}} = \frac{C}{r^\gamma} \quad (\text{A5.23})$$

$$C = k \cdot r_0^\gamma \cdot \Delta T_p \quad (\text{A5.24})$$

$$k = 0,68 + 0,16 \cdot (1 - e^{-d}) \quad (\text{A5.25})$$

$$r_0 = 0,18 \cdot H \quad (\text{A5.26})$$

$$\gamma = \frac{2}{3} - \alpha \cdot (1 - e^{-d}) \quad (\text{A5.27})$$

$$T_{\text{jet}} = T_s + \Delta T_{\text{jet}} \quad (\text{A5.28})$$

Mit:

ΔT_{jet} Temperaturdifferenz zwischen Ceiling Jet und Heißgasschicht [°C],

T_{jet} Ceiling Jet-Temperatur [°C],

$T_{\text{Heißgas}}$ Rauchgastemperatur [°C],

H Abstand Brandherd-Decke [m],

d Dicke der Rauchgasschicht [m],

α Konstante (0,44) [-].

Auch bei diesen modifizierten Ansätzen sind die Randbedingungen zu beachten. Genau wie bei den Ansätzen ohne Berücksichtigung der Rauchgasschicht ist auf die Ausdehnung und die Lage der Brandquelle zu achten. Beispielsweise verändern sich bei Brandquellen in der Nähe einer Wand oder einer Ecke die Einmischungsverhältnisse in den Plume, was zu veränderten Temperaturprofilen führt.

Tabelle A 5.1 Zusammenstellung von Plume-Formeln nach BSI DD 240:Part1:1997 Fire Safety Engineering in Buildings. Guide to the application of fire safety engineering principles und Part 2:1997 Fire Safety Engineering in Buildings.

Zeile	Geometrie	sonstige Bedingungen, Gültigkeitsbereich	Formel	Grenzwerte von β nach BSI DD 240: part 2:1997	Kommentar
1	Axialsymmetrie, Lachenbrand, kleine Brandfläche, kein Wandeinfluss	$D \leq z / 10$ $z \gg z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,071 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3}$	0,7 ... 1,5	Einfluss der Umgebungsturbulenz + 20 % bis + 50 %
2	kleine Brandfläche, auch von Axialsymmetrie abweichend, kein Wandeinfluss	Länge < 3 x Breite (bezogen auf die Grundfläche)	$\dot{m}_e = 0,071 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot z^{5/3}$	keine Angabe	Vereinfachung; ohne virtuellen Ursprung
3	an ebener Wand anliegende Strömung	$D \leq z / 10$ $z \gg z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,044 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot z^{5/3}$	0,6 ... 1,6	Einfluss der Umgebungsturbulenz + 20 % bis + 50 %
4	an Wandecke anliegende Strömung	$D \leq z / 10$ $z \gg z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,028 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot z^{5/3}$	0,5 ... 2,0	Einfluss der Umgebungsturbulenz + 20 % bis + 50 %
5	Axialsymmetrische Rauchgassäule, große Brandfläche, rund oder quadratisch	$D > z / 10$ (d. h. bis zu begrenzten Aufstiegshöhen) $z < 2,5 \times U$ $200 < \dot{q}'' < 750$ [kW/m ²]	$\dot{m}_e = 0,188 \cdot z^{3/2} \cdot U$ (Gl. 31 DD 240:part 1:1997) $\dot{m}_e = 0,337 \cdot z^{3/2} \cdot U$ (kleine Räume, prEN 12101-5)	0,75 ... 1,15	

6	Linienquelle	Länge $D > 3x$ Breite der Schmalseite $z_{fl} < z < 5 \times D$	$\dot{m}_e = 0,21 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot D^{2/3} \cdot z$	0,86 ... 1,36	Anwendung auf $z \geq 2 \times D$ begrenzen, für $z \geq 5 \times D$ Gl. nach Zeile 2
7	Linienquelle	Länge $D > 3 \times$ Breite der Schmalseite $z > 5 \times D$	$\dot{m}_e = 0,071 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot z^{5/3}$	keine Angabe	
8	Plume über Brandraumöffnung (1); Massenstrom aus Brandraum	$b_F / L \geq 1$	$\dot{m}_e = 0,09 \cdot (\dot{Q}_p b_F^2)^{1/3} \cdot h$	0,7 ... 1,1	Entstehungsbrand (pre- flashover); $b_F / h_F \geq 1$
9	Plume über Brandraumöffnung (2), in den Plume oberhalb der Öffnung eingesaugter Massenstrom	$b_F \gg h$, bei anderen Geo- metrien der Öff- nung etc. siehe NFPA 92 B	$\dot{m}_e = 0,23 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot b_F^{2/3} \cdot (z_F + h)$	0,7 ... 1,5	frei aufströmendes Rauchgas, bei Anlehnen an aufge- hende Wand \dot{m}_e um 1/3 reduzieren
10	wie vor, jedoch mit Balkon und Rauchschürzen außerhalb des Brand- raums	$l_{RS} \gg h_B$	$\dot{m}_e = 0,36 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot l_{RS}^{2/3} \cdot (z_B + 0,25 \cdot h_B)$	0,7 ... 1,4	siehe Kommentar ⁽⁺⁺⁺⁾
11	wie vor, jedoch ohne Rauchschürzen		$\dot{m}_e = 0,36 \cdot \dot{Q}_p^{1/3} \cdot (b_F + b_B)^{2/3} \cdot (z_B + \frac{h_B}{4})$	0,7 ... 1,4	siehe Kommentar ⁽⁺⁺⁺⁾

⁽⁺⁺⁺⁾ Kommentar zu den Zeilen 10 und 11:

Bei großen Aufstiegshöhen wird angenommen, dass die Strömung axialsymmetrisch geworden ist. Unter der Bedingung, dass $z > 5 h$ bzw. $z > 3 h_B$ kann die Gleichung nach Zeile 1 verwendet werden, wobei $z_0 = 0$ dann verwendet wird, wenn dies zu einem konservativeren Ergebnis (d. h. einem größeren Wert von \dot{m}_e) führt. Wenn jedoch das in Frage kommende Kriterium zur Risikobewertung die Rauchgastemperatur oder die Rauchkonzentration ist, dann erhält man durch Anwendung des jeweils niedrigeren Wertes von \dot{m}_e die konservativere, d. h. auf der sichereren Seite liegende Lösung. Letztere Anmerkungen sind jedoch unabhängig von der Variationsbreite, die sich aus der Anwendung der durch die in der Tabelle angegebenen Vertrauensintervallparameter ergeben.

BESCHREIBUNG DER EXPERIMENTELLEN MODELLE

A5.2 Allgemeines

Hinsichtlich der experimentellen Modelle unterscheidet man zwischen Untersuchungen an verkleinerten Modellen und objektspezifischen Versuchen im Maßstab 1:1.

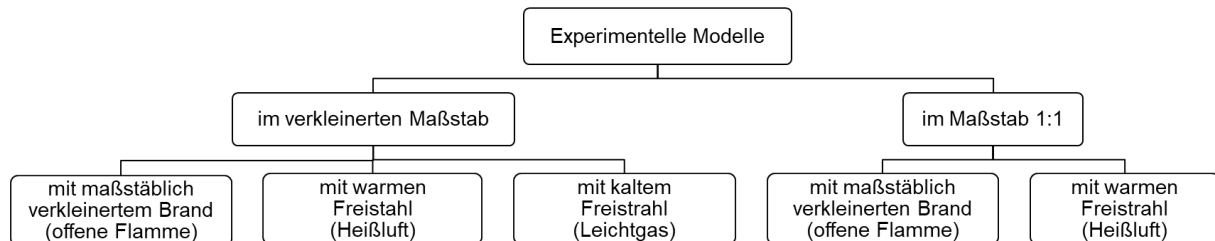


Bild A 5.4 Übersicht der experimentellen Modelle

Bei der Darstellung eines Brandgeschehens mit Hilfe eines experimentellen Modells geht es nicht um die Abbildung des Brandes an sich, sondern um die Untersuchung der brandgeprägten Raumluftrömung und damit um die Untersuchung von Rauchgasverteilungen und -strömungen in Gebäuden und die Dimensionierung von Rauchableitungseinrichtungen.

Die Strömungsvorgänge im Gebäude bei einem Brand werden wesentlich geprägt durch den sich oberhalb der Brandquelle entwickelnden Thermikstrahl (Plume), der als anisothermer Luftfreistrah im Raum wirkt.

Im Gegensatz zu isothermen Freistrahlen, bei denen die Volumenzunahme durch Induktion direkt proportional zur Lauflänge erfolgt, wächst beim gegenüber der Umgebung wärmeren Strahl das Volumen überproportional zur Strahllauflänge an. Auch wenn der Begriff „anisotherm“ sich auf eine ungleiche Temperatur bezieht, ist doch die Dichtedifferenz mit ihrer Auftriebswirkung das entscheidende Kriterium. Der Exponent der Massenzunahme beim anisothermen Freistrah über die Wegstrecke wurde mit ca. $5/3$ festgestellt [5.39], [5.40]. Dabei zeigten zahlreiche Versuche, dass dies gleichermaßen für Thermikstrahlen mit geringer wie Thermikstrahlen mit hoher Übertemperatur gilt [5.41], [5.42], [5.59], [5.60].

Simulationen mit experimentellen Modellen können durchgeführt werden durch Nachbildung des Thermikstrahles oder durch maßstäblich verkleinerte Realbrände.

A5.2.1 Der Begriff der Ähnlichkeit

Ziel beim Einsatz von experimentellen Modellen ist die anschauliche Visualisierung der Ver Rauchung, welche dem Realgeschehen möglichst ähnlich ausfallen sollte, an einem realen Modell. Damit sollten sich idealerweise im Modell identische Momentanbilder einstellen wie in der Realität zu den von Vermischungen, Ausbreitungsvorgängen, Zu- und Abstrom der Gase geprägten Rauchgasverteilungen – nur eben im Längenmaßstab bzgl. aller drei Dimensionen verkleinert bzw. vergrößert, im zeitlichen Ablauf gerafft bzw. gestreckt und Entsprechendes in anderen zu beachtenden Maßstäben.

In der „Ähnlichkeitstheorie“ versteht man unter „mechanischer Ähnlichkeit“, wenn – abgesehen von einer Proportionalität der äußeren Abmessungen in allen drei Dimensionen und der Proportionalität der Oberflächenbeschaffenheiten – auch Proportionalität aller an der Strömung beteiligten mechanischen Größen gegeben ist [5.43], [5.44].

Die Gesetzmäßigkeiten zu Modellversuchen und damit Regeln für die Durchführung und Bewertung von Modellversuchen gewinnt man aus den Größenbeziehungen, die den betrachteten physikalischen Vorgang beschreiben. Hierzu zählen bei den im Brandfall vorliegenden anisothermen, turbulenten Strömungen die Differentialgleichungen zur:

- Bewegung und
- Energie.

Die Bewegungsgleichungen geben das Gleichgewicht der auf eine Volumeneinheit bezogenen Kräfte wieder. Dynamik (Bewegung) ist die Konsequenz aus angreifenden Kräften. Gleiche Kräfteverhältnisse (sprich Quotienten) aus Reibung, Trägheit und Beschleunigungskräften führen zu einander ähnlichen Bewegungen.

Entsprechendes gilt für die Bilanzen zum Energiefluss (Wärmeübergang, Wärmeleitung, Wärmewandlung durch Viskosität). In der Energiegleichung ist das Gleichgewicht der durch Transport und Leitung übertragenen Wärmeleistungen pro Volumeneinheit dargestellt, und in der Wärmeübergangsgleichung entspricht die pro Flächeneinheit übertragene Wärme dem im Grenzschichtbereich transportierten Wärmestrom.

Durch die Bildung von Quotienten jeweils zweier im Kräfte- oder Flussgleichgewicht befindlicher Größen (gleicher Einheit) erhält man dimensionslose Größen, die sogenannten „dimensionslosen Kennzahlen“. Diese bestimmen die Ähnlichkeit der durch sie charakterisierten Prozesse. Wenn am Beispiel der drei die Bewegung bestimmenden Größen Antrieb (z. B. Auftrieb, Druck, Schwerkraft), Trägheit und Reibung jeweils zwei davon ins Kräfteverhältnis gesetzt werden, so muss die dritte, vernachlässigte Kraftart hier eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Tabelle A 5.2 Dimensionslose Kennzahlen aus dem Bereich der Dynamik und ihre Bedeutung

Bedeutung der Kräfte	Quotient	Name	Anwendung
Druck : Trägheit	$Eu = \frac{p}{w^2 \cdot \rho}$	Euler-Zahl	Druckdifferenzen, z. B. Absaugung
Trägheit : Schwerkraft	$Fr = \frac{w^2}{g \cdot L}$	Froude-Zahl	vernachlässigbare Gasdichte
Auftrieb : Trägheit	$Ar = \frac{g \cdot L}{w^2} \cdot \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho}$ $Ar = \frac{g \cdot L}{w^2} \cdot \frac{T - T_\infty}{T_\infty}$	Archimedes-Zahl	Relevanz von Dichteunterschieden, z. B. Plume

Auftrieb: rel. Trägheit	$Ri = \frac{g \cdot \Delta L}{(\Delta w)^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}$	Richardson-Zahl	Stabilität Gasschichtung bei Medien mit Relativgeschwindigkeit
Trägheit : Reibung	$Re = \frac{w \cdot L}{\eta/\rho} = \frac{w \cdot L}{\nu}$	Reynolds-Zahl	Turbulenzverhalten Strömung

Bewegungsgleichungen und abgeleitete Größen

Für Bereiche starker Beschleunigung, in denen die Reibung vernachlässigt werden kann, sind alle Quotienten relevant, wo eine Antriebsgröße ins Verhältnis mit der Trägheit gesetzt wird – z. B. die Euler-Zahl Eu mit einem Antrieb durch äußere Drücke und die Archimedes-Zahl Ar mit der für den Plumbereich dominierenden Auftriebswirkung.

Tritt die Antriebskraft gegenüber der Reibungskraft zurück, so charakterisiert das Kräfteverhältnis aus Trägheit und Reibung die Bewegung und das Turbulenzverhalten der Strömung. Dies wird durch die Reynoldszahl Re ausgedrückt. Große Re-Zahlen stehen für eine eher turbulente Strömung, kleine Re-Zahlen eher für eine laminare Strömung, wobei für Freistrahlen der Übergangsbereich ab 3.000 angesiedelt ist. Dabei ist der „thermische Plume“ des Feuerplumes immer als *turbulenter* Freistrahler anzusehen; Raumbände sowie der Brandnahbereich größerer Brände weisen nahezu ausnahmslos ein turbulentes Strömungsverhalten auf.

Energiegleichungen und abgeleitete Größen

Aus der Energiegleichung folgt im Wesentlichen die Grashofzahl Gr, die Prandtlzahl Pr, und die Wärmeübergangsgleichung liefert das Ähnlichkeitskriterium nach Nusselt Nu.

Tabelle A 5.3 Dimensionslose Kennzahlen aus dem Bereich der Energie und ihre Bedeutung

Bedeutung der Kräfte	Quotient	Name	Anwendung
$\frac{\text{Auftrieb}}{\text{Trägheit}} \cdot \left(\frac{\text{Trägheit}}{\text{Reibung}} \right)^2$	$Gr = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho}$ $Gr = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \frac{T - T_\infty}{T_\infty}$	Grashof-Zahl	Freie Konvektionsströmung an Flächen
Zähigkeit : Temperaturleitfähigkeit	$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$	Prandtl-Zahl	Freie und erzwungene Konvektion
Transp. Wärmemenge : Wärmeableitung	$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	Nusselt-Zahl	Erzwungene Konvektion

A5.2.2 Eigenschaften des Plumes und die Archimedeszahl

Oberhalb der Verbrennungszone eines lokalen Brandes setzt der sogenannte thermische Plume ein, der auch als „Ähnlichkeitsbereich“ bezeichnet wird. Der thermische Plume (wie generell nicht-isotherme Freistrahler) ist mit sich selber ähnlich, d. h. für Schnittebenen in

unterschiedlicher Höhe ergeben immer wieder ähnliche Profile zu Geschwindigkeit, Temperaturerhöhung und Konzentration über die sich mit der Höhe aufweitende Schnittebene. Außerdem ähneln die Schnittebenen kleinerer Brände denen von größeren Bränden, nur eben in einer anderen Plumehöhe, mit anderer Aufweitung und anderen Spitzenwerten. Die Abnahme des auf der Plumeachse angesiedelten Maximalwertes geschieht entsprechend [5.52]

$$\text{Temperaturerhöhung: } \Delta T \approx \dot{Q}^{2/3} \cdot h^{-5/3} \quad (\text{A5.29})$$

$$\text{Geschwindigkeit: } w \approx \dot{Q}^{1/3} \cdot h^{-1/3} \quad (\text{A5.30})$$

Vergleicht man nun die Temperaturerhöhungen im Plume zweier Brände miteinander oder ein und desselben Brandes in unterschiedlicher Höhe, indem man den Quotienten aus den Temperaturerhöhungen bildet $M_{\Delta T} = \frac{\Delta T^*}{\Delta T}$, so lässt sich dieses Temperaturverhältnis durch das

Energieverhältnis $M_Q = \frac{Q^*}{Q}$ und

das Längenverhältnis $M_L = \frac{h^*}{h}$ (den „Längenmaßstab“) ausdrücken:

$$M_{\Delta T} = \frac{\Delta T^*}{\Delta T} = \left(\frac{Q^*}{Q} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{h}{h^*} \right)^{5/3} = M_Q^{2/3} \cdot M_L^{-5/3} \quad (\text{A5.31})$$

Analog lässt sich mit den Geschwindigkeiten verfahren, wobei sich die Beziehung

$$M_w = \frac{w^*}{w} = \left(\frac{Q^*}{Q} \cdot \frac{h}{h^*} \right)^{1/3} = \left(\frac{M_Q}{M_L} \right)^{1/3} \quad (\text{A5.32})$$

ableitet. Gleichwohl gilt

$$M_w = \frac{w^*}{w} = \frac{h^*}{t^*} \cdot \frac{t}{h} = \frac{h^*}{h} \cdot \frac{t}{t^*} = \frac{M_L}{M_t} \quad (\text{A5.33})$$

was zu einem „Zeitmaßstab“ M_t für Abbildungen bzgl. des thermischen Plumes führt:

$$M_t = M_Q^{-1/3} \cdot M_L^{4/3} \quad (\text{A5.34})$$

Bei der Abbildung des brandbedingten Verrauchungsgeschehens im experimentellen Modell kommt dem Herd der Rauchentstehung und allen auftriebsgeprägten Luftströmungen besondere Bedeutung zu. Damit ist vor allem die Archimedeszahl von primärer Wichtigkeit und sollte im Modell den gleichen Zahlenwert besitzen wie in Realität (bei gleicher Bezugsgröße und gleichem Ort).

Für den thermischen Plume eines Brandes gilt immer

$$M_{Ar} = M_Q^{2/3} \cdot M_L^{-2/3} \cdot M_L^{2/3} \cdot M_Q^{-2/3} = 1 \quad (\text{A5.35})$$

was bedeutet, dass die Archimedeszahl für alle lokalen Brände eine Konstante ist [5.44], [5.61].

A5.2.3 Abbildungsbereich und Abbildungsregeln

Auch beim Einsatz von Warmrauch oder Leichtgas¹ – trotz eines Strömungsprofils, das bei maschineller Einleitung an der Austrittsstelle i. d. R. vom Strömungsprofil des nichtisothermen Freistrahls abweicht – entsteht nach einer gewissen Strecke ein vollständig ausgebildetes Strömungsprofil eines anisothermen Freistrahls, der ähnlichen Gesetzmäßigkeiten wie der Plume oberhalb der Verbrennungszone gehorcht. Um eine Übertragung der Volumenströme und der Zeitabläufe, der Dichte (bzw. Temperaturen) vom Modellgeschehen auf einen bestimmten Brand zu erhalten, muss die Ar-Zahl für Modell und Brand an relevanten Stellen gleich gesetzt werden [5.46], [5.62].

Dies gilt vor allem für den Quellbereich der Rauchentstehung. Bei der maschinellen Einleitung eines Brandgases wird ein Brand mit Pyrolyse, Flammen und Verbrennung ausgeblendet². Damit gibt es eine Schnittstelle zwischen ausgeblendetem Brand und dem erzeugten Rauchgasplume. Hier sind Dichtedifferenz, der Austrittsvolumenstrom und die zugehörige Austrittsfläche bzw. der Anfangsimpuls – im Zusammenhang mit der gewählten Längenskalierung des Modellraums – zu beachten. Damit beginnt der eigentliche Abbildungsbereich erst deutlich oberhalb der Austrittsstelle.

Aus dem gewählten Modell-Längenmaßstab und einer weiteren zweckmäßig zu wählenden Beziehung (z. B. gleiche Dichte für Leichtgas) resultieren der Zeitmaßstab und die damit verbundenen Maßstäbe zu Geschwindigkeit, Volumenstrom usw..

Selbst beim 1:1-Modell und verkleinerter Wärmefreisetzung gegenüber dem Realbrand kann eine Ähnlichkeit der Verrauchung (mit größeren Fehlern im Bereich der Wärmeübergänge) mit einem aus der Einhaltung der Archimedeszahl abzuleitenden Maßstabsfaktor für die Zeit nachgestellt werden [5.59], [5.60], [5.63], [5.64].

Über die Plumegleichungen gelingt auch die Zuordnung zu einer diesem Modellbrand äquivalenten Wärmefreisetzung für das Szenario im Realmaßstab, die unter Berücksichtigung des abgeleiteten Zeitmaßstabs und des vorgegebenen Längenmaßstabs zu einem vergleichbaren Einmischungsverhalten, Rauchgasvolumen usw. führen würden. Leider können nicht gleichzeitig andere relevante (Turbulenzverhalten, Wärmeübergang) Aspekte beschreibende Kennzahlen eingehalten werden. Hinsichtlich der modellbedingten Randbedingungen wird auf die Veröffentlichung in [5.44] hingewiesen.

A5.2.4 Hinweise für die Modellierung, Modellmaßstab und Modellgestaltung

Modelle sind so auszubilden, dass alle die Strömung beeinflussenden Details maßstabsgetreu abgebildet sind. Dies erfordert einen sehr sorgfältigen Modellbau, da sich Abweichungen in der geometrischen Ähnlichkeit sehr stark auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auswirken können. Dies betrifft auch die Fläche des zu simulierenden Brandes [5.46], [5.54].

Durch viele Anwendungen, deren Anfänge in den 1960er und 1970er Jahren lagen [5.53], [5.55], ist nachgewiesen, dass bei freien, turbulenten Strömungen die Re-Zahl von untergeordnetem Einfluss bleibt, sodass vor allem die den Strömungsvorgang (Antrieb) beschreibenden Größen Ar und an der Systemgrenze Eu einzuhalten sind. Dabei ist es eine notwendige

¹ Bei Verwendung von Leichtgas soll die Strömung voll turbulent ausgebildet sein.

² Bei Verwendung von Leichtgas und langgestreckten Gebäuden werden die Wärmeübergangsbedingungen unzureichend berücksichtigt.

Bedingung für Untersuchungen von Strömungsprozessen in Modellen mit verkleinertem Maßstab, dass die Strömungen sowohl in der Natur als auch im Modell voll ausgebildet turbulent ablaufen. Hierfür hat sich $Re > 10.000$ für Modelle mit verkleinertem Brand bewährt.

Um diese Bedingung zu erfüllen, müssen die Modelle zur Untersuchung möglichst groß gewählt sein. Als Erfahrungswert hat sich der Modellmaßstab $M \geq 1:20$ (1:30 für sehr große Gebäude) bewährt, wobei Raumhöhen im Modell von 300 mm nicht unterschritten werden sollten.

Bei kleineren Modellen $M < 1:20$ sind große Abweichungen zwischen Natur- und Modellströmung zu erwarten, die in der Regel zu einer Überdimensionierung der abzuleitenden Entrauchungsmaßnahme führen [5.46].

Eine Ausnahme bildet die Strömungssituation bei der Gebäudeaerodynamik, da durch Ablöseeffekte an scharfkantigen Gebäudemodellen die Gesamtströmung im Windkanal als ausgebildet turbulent betrachtet werden kann und keine großen Temperaturunterschiede zu beachten sind [5.45], [5.47].

Tabelle A 5.4 Brandeffekte im Original und im Modell

Brandeffekt	realisierbar im Modell (verkleinert)
Realtemperaturen	Ja, Temperaturfelder sind ähnlich; bei Maßstabsgrößen $< 1:10$ mit höheren Unsicherheiten verbunden
Wärmefreisetzung	Ja, kann umgerechnet werden
Rauchgasstrom	Ja, Plume-Gleichungen gelten unter Berücksichtigung des Modellmaßstabs
Rauchgasausbreitung	Ja, Ähnlichkeit der Strömungsprozesse
Zu- und Abgasstrom	Ja, soweit vergleichbare Randbedingungen zur Umgebung eingehalten sind
Flammenausbildung	Ja, $\geq 1:5$, Flammenhöhe, Temperatur und Strömung in der Flamme (nur für Modelle nach 5.4.6.1)
Raucharme Schicht	Ja, Beobachtung
Wärmebelastung von Bauteilen	nein

Zur Untersuchung von Windeinflüssen müssen Modelluntersuchungen daher in einem Grenzschichtwindkanal durchgeführt werden. Hier bestimmt i. A. die Größe des Windkanals die Größe der Modelle. Typische Modellmaßstäbe sind 1:50 und 1:100 für sehr große Gebäude. Damit sind auch in gewissem Rahmen Auswirkungen auf innere Raumströmungen qualitativ darstellbar [5.65].

Bei der Rauchbeobachtung wird dem simulierten Brandgeschehen Rauch oder ein Nebelfluid (langanhaltender Nebel) beigemischt. Die Quantifizierung z. B. der Höhe der raucharmen

Schicht erfolgt visuell. Die örtliche Verdünnung von Brandgasen kann mittels der Spurengas-methode quantifiziert werden. Bei Brandversuchen an verkleinerten Modellen kann die Rauch-ausbreitung zusätzlich mittels Temperaturmessung überprüft werden.

A5.2.5 Besonderheiten bei einzelnen Modelltypen

Im Folgenden sollen einige Besonderheiten einzelner Modelltypen diskutiert werden. Zu den Modelltypen mit Heißluftstrahl und Leichtgas siehe folgende Literaturangaben [5.62], [5.67], [5.68].

A5.2.6 Der maßstäblich verkleinerte Brand mit identischer Temperaturabbildung

Soll bei einem maßstäblich skalierten Brand das Temperaturverhalten an der entsprechenden Stelle im Modell identisch dem des abzubildenden Realbrandes werden, so muss die Wärme-freisetzung des Modellbrandes wegen $M_{\Delta T} = 1$ gemäß

$$M_Q = M_L^{5/2} \quad (\text{A5.36})$$

zum Längenmaßstab des Modells skaliert werden.

Wird die abbildende Wärmefreisetzung gemäß Gl. (A5.36) vorgegeben, so folgt direkt aus dem Modellmaßstab (Längenmaßstab) der Maßstab für die Zeit und folgerichtig die Maßstäbe für Geschwindigkeit und Volumenströme [5.44]

$$M_t = M_L^{1/2} \quad (\text{A5.37})$$

$$M_w = M_L^{1/2} \quad (\text{A5.38})$$

$$M_v = M_L^{5/2} \quad (\text{A5.39})$$

Speziell für den kleinskaligen niederenergetischen Brand mit Einhaltung der Temperaturerhö-hung im thermischen Plume sind weitreichende Parallelen zum großen Brandgeschehen her-zustellen. Dazu sind Längenmaßstäbe unter 1:10 (besser 1:5 und kleiner) einzuhalten, da ge-rade der Bereich der Verbrennung nicht skaliert werden kann und die Verbrennungszone im Modell die analogen Abmessungen im Original überschreitet [5.43].

Bei Überprüfung an unterschiedlichen Messorten zeigt sich, dass die Ar-, Fr- und Eu-Zahl für das Modell gegenüber der Realität in den Grenzen von -15 % bis 25 % Abweichung eingehal-ten werden können. Es wird bei [5.43] die „Methode der angenäherten Modellierung“ [5.66] angewandt, das heißt, dass je nach Zielstellung die jeweils bedeutsamen Ähnlichkeitszahlen einzuhalten sind.

A5.2.7 Versuche im Maßstab 1:1 (Objektgebundene Versuche)

Objektspezifische Rauchversuche können nach Fertigstellung eines Gebäudes zur Prüfung der strömungstechnischen Wirksamkeit von Rauchableitungsanlagen durchgeführt werden.

Eine praktische Überprüfung als Funktionsprobe von Entrauchungskonzepten unter realisti-schen Brandbedingungen scheidet im Allgemeinen aus. Es können nur modellhafte Versuche im Gebäude durchgeführt werden, die möglichst realitätsnahe Ergebnisse liefern sollen.

Zur praktischen Überprüfung von Rauchgasströmungen im Gebäude können erwärmte Luft oder offene Poolbrände mit flüssigen Brennstoffen bzw. Gasbrenner eingesetzt werden. Zur Visualisierung der Rauchgasströmungen werden der Auftriebsströmung meist Aerosole aus Nebelfluiden oberhalb der Flammenzone beigemischt. Detaillierte Ausführungen zu Abnahmeversuchen können dem technischen Bericht der vfdb [5.48] bzw. der VDI-Richtlinie 6019 Blatt 1 [5.54] entnommen werden.

Zur Durchführung derartiger Versuche sind insbesondere folgende Randbedingungen einzuhalten:

- Alle notwendigen Einrichtungen zur Funktion der Rauchableitungsanlage (z. B. Zu- und Aböffnungen, Rauchschürzen, Meldesysteme, Ersatzstromversorgung, Türansteuerungen) müssen installiert und funktionsfähig sein und bei der Versuchsdurchführung entsprechend der vorgesehenen Funktion betrieben werden.
- Details im Gebäude und Einbauten, die die Rauchgasströmungen beeinflussen (z. B. Geländer, Sonnenschutzvorrichtungen) müssen vorhanden sein oder strömungstechnisch sorgfältig nachgebildet werden.
- Raumluftechnische Anlagen müssen wie geplant vorhanden und entsprechend dem Konzept der Rauchableitung funktionieren.
- Die Gebäudehülle und die öffnungsschließenden Elemente müssen vollständig vorhanden und funktionsfähig sein.

Die Versuche sind ausreichend zu dokumentieren.

Zur Durchführung objektspezifischer Abnahmeversuche stehen folgende Verfahren zur Verfügung:

- Erwärmte Luft (bis ca. 150 kW Wärmefreisetzung)
- Erwärmte Luft (bis ca. 1,5 MW Wärmefreisetzung mit Gasbrennern bzw. Lachenbränden)

Bei der Extrapolation auf Brände mit höherer Wärmefreisetzung sind die Übertragungsfunktionen aus der Ähnlichkeitslehre der Strömungsmechanik anzuwenden [5.44].

A5.2.8 Besonderheiten bei Windkanaluntersuchungen

Die Simulation der atmosphärischen Windströmung ist in den Windkanälen der Luftfahrttechnik nicht möglich. Das in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts entstandene Arbeitsgebiet der Bauwerksaerodynamik machte daher die Entwicklung eines neuen Windkanaltyps, des Grenzschicht-Windkanals, erforderlich. In diesem wird die atmosphärische Windgrenzschicht, beschrieben durch die Profile der mittleren Windgeschwindigkeit und der Turbulenzintensitäten sowie des Spektrums der Turbulenzenergie, modelliert. Grenzschicht-Windkanäle besitzen immer eine Anlaufstrecke, in welcher auf dem Windkanalboden geeignete Rauigkeiten aufgebracht sind. Nähere Einzelheiten zu Grenzschichtwindkanälen und zur Simulation der atmosphärischen Windströmung finden sich z. B. in [5.45] und [5.46].

Wenn Windeinflüsse zu berücksichtigen sind, ist es wichtig, die Größe der Turbulenz (= Böigkeits)-Ballen zumindest näherungsweise entsprechend dem verwendeten Gebäudemaßstab zu skalieren. Die Ähnlichkeitskennzahl, die dies zum Ausdruck bringt, ist die Jensen-Zahl:

$$Je = \frac{h}{z_0} \quad (\text{A5.40})$$

mit:

h: Gebäudehöhe

z_0 : Rauigkeitsparameter

Zur Modellierung von atmosphärischen Windströmungen im Windkanal sei auf das Merkblatt der Windtechnologischen Gesellschaft (WtG) [5.47] verwiesen.

A5.2.9 Zusammenfassung

Die experimentellen Modelle eignen sich besonders zur Erstellung von Entrauchungskonzepten und zur Beurteilung von Rauchgasströmungen im Gebäude – auch bei komplexen Strukturen. Die zu untersuchenden Gebäude bzw. Räume müssen ähnlichkeitsgetreu im entsprechenden Maßstab einschließlich aller strömungstechnisch relevanten Details nachgebildet werden. Neben der geometrischen Ähnlichkeit ist die physikalische Ähnlichkeit einzuhalten.

Die die Strömungsvorgänge beschreibenden Ähnlichkeiten, die sich aus den o. g. Gleichungen für Bewegung, Energieerhalt und Wärmeübergang für freie turbulente Strömungen ableiten lassen, sind zu beachten. Dadurch werden auch dem Modellmaßstab die genannten Grenzen gesetzt. Neben der erforderlichen Erfahrung des Modellierers z. B. hinsichtlich der Ausbildung der erforderlichen turbulenten Strömungen am Modell sind genaue Kenntnisse zu den Randbedingungen und Eingabedaten notwendig – z. B. dahingehend, dass mit der Simulation – im Gegensatz zu Zonen- und CFD-Modellen – erst in der Ebene oberhalb der Flammenspitzen zu beginnen ist (Flammenspitzen müssen grundsätzlich unterhalb der Rauchgasschicht liegen). Beim maßstäblich verkleinerten Brand wird die Verbrennungszone näherungsweise modelliert.

Die Wärmeabgabe an Bauteile wird bei den experimentellen Modellen nicht der Realität entsprechend abgebildet – sie sind deshalb zu Bauteiltemperaturbestimmung nicht geeignet! Durchgeführte Modelluntersuchungen und -vergleiche mit experimentellen Modellen, Zonen- und CFD-Modellen sowie Originalbrandversuchen zeigten hinsichtlich der Rauchgasströmungen, -temperaturen und -schichtungen für die untersuchten Szenarien eine relativ gute Übereinstimmung.

Die Hauptvorteile der experimentellen Modelluntersuchungen liegen in ihrer sehr anschaulichen Ergebnisdarstellung, den einfach vorzunehmenden Parameterveränderungen hinsichtlich der Strömungsverhältnisse und baulicher Einflussgrößen am Modellkörper mit der sofortigen Bewertbarkeit ihrer Einflüsse auf das Ergebnis.

Genau wie bei den mathematischen „Modellen“ gilt, dass ein Modell immer die Abbildung eines realen Geschehens mit bestimmten Einschränkungen, Vereinfachungen ist: d. h. ausgewählte Phänomene werden berücksichtigt und sollen studiert werden können, andere werden vernachlässigt (z. B. die thermische Zerstörung von Bauteilen).

BEISPIELE FÜR BERECHNUNGEN MIT MATHEMATISCHEN MODELLEN

A5.3 Vorbemerkungen

Die nachstehenden Unterkapitel haben eine vielfältige Funktion. Sie sollen einerseits einen Überblick über Vergleichsrechnungen bieten, darüber hinaus aber auch bereits Hinweise auf Fehlerbandbreiten und Grenzen für die Anwendung geben.

A5.3.1 Plume-Temperatur und Ceiling-Jet

Im Folgenden werden die in Anhang A5.1 angegebenen Gleichungen eingesetzt, um die Deckentemperaturen über dem Brandherd bei Poolbrandversuchen mit Spiritus zu bestimmen. Dabei handelt es sich um Versuche, die in einem Brandraum mit ca. 40 m² Grundfläche und einer lichten Raumhöhe von ca. 6,20 m durchgeführt wurden [5.18]. Bei den dort durchgeführten Versuchen wurden die Größe des Spiritus-Pools und damit die Wärmefreisetzungsrate und die Lage des Pools im Brandraum variiert. Außerdem wurde die Ventilation über in den Wänden angebrachte Fenster oder über horizontale Öffnungen in der Brandraumdecke geändert. Nebenher wurde der Einfluss unterschiedlicher Fenstermaterialien untersucht:

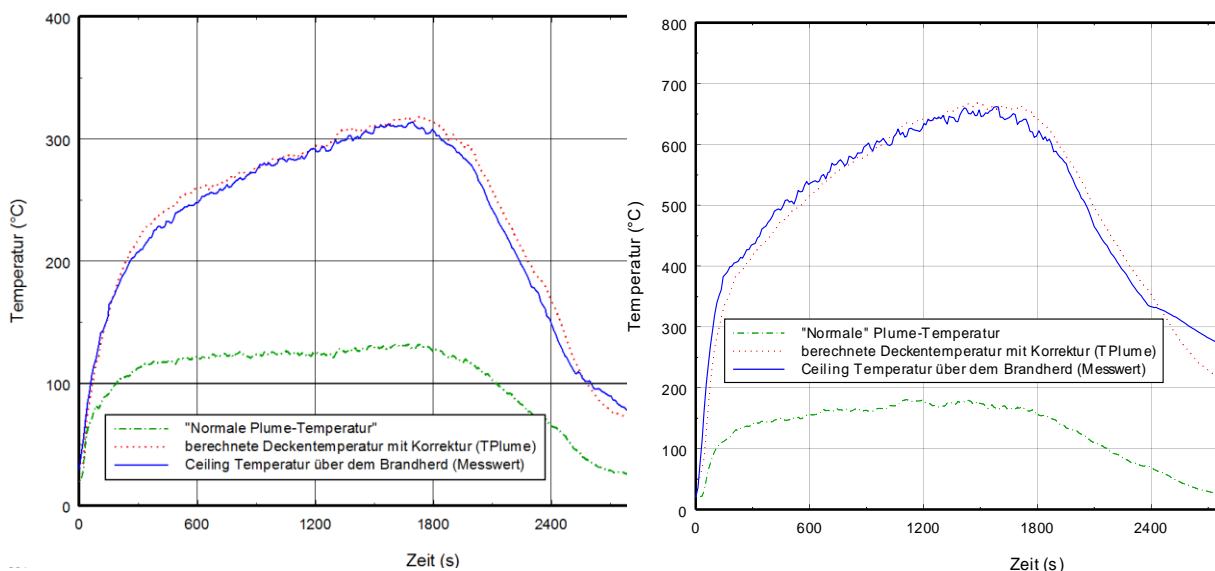


Bild A 5.5 Gemessene und berechnete Deckentemperatur bei einem Poolbrand, links im Bild ca. 1 MW Brandleistung; Eckenposition des Brandherdes, rechts im Bild ca. 1,8 MW Brandleistung; Brandherd in der Mitte des Brandraums [5.19]

Versuche mit 120 l Spiritus wurden in zwei nebeneinander stehenden Wannen mit insgesamt 1,5 m² Fläche durchgeführt. Im Ergebnis stellte sich eine Brandleistung von ca. 1 MW ein. Für weitere Versuche mit ca. 1,8 bis 2 MW Brandleistung wurde eine Brennstoffmenge von 200 l Spiritus in einer 3 m² großen Wanne eingesetzt. Die Höhe der brennenden Oberfläche befand sich ca. 0,7 m über dem Boden des Brandofens. Bild A 5.5 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen [5.19]. Dabei sind die Rechenwerte ohne Berücksichtigung der Korrektur als „normale“ Temperatur gekennzeichnet.

Es zeigt sich, dass die Berücksichtigung der Korrektur notwendig ist, um eine adäquate Beschreibung des Temperaturniveaus zu erreichen.

Weitere Vergleiche der berechneten Temperaturen mit den Messwerten aus Großbrandversuchen [5.17] ergeben, dass der obige Ansatz die Versuchswerte gut annähert (Tabelle A 5.5).

Tabelle A 5.5 Vergleich zwischen Messwerten und Formeln

\dot{Q} [MW]	ΔT_p Messwert [K]	ΔT_p Gl. (5.40) [K]
7,7	102	98
15,7	116	126
33	222	217

Einen weiteren interessanten Vergleichstest liefern die Experimente in einer 144 m x 65 m x 28 m (L x B x H) großen Halle dar [5.70]. Hierbei dienten Holzpaletten als Brandlast (ca. 3.500 kg). Bei diesem Experiment erfolgte die Messung von Temperaturen an verschiedenen Orten oberhalb des Brandherds in einer Höhe zwischen 10 m und 22 m. Aufgrund der Hallengröße und den vorhandenen Rauch- und Wärmeabzugsflächen im Dach lag die mittlere Rauchgas-temperatur im Zeitbereich des Brandmaximums zwischen 40 °C und 60 °C, die Temperaturwerte im Brandnahbereich aber signifikant darüber. Weiterhin ist bei diesem Vergleich wesentlich, dass zwar die Abbrandrate gemessen wurde, diese jedoch mit beträchtlichen Schwankungen behaftet ist. Für die Berechnung muss zudem ein effektiver Heizwert angenommen werden, um die Wärmefreisetzungsrates anzugeben. Dieser effektive Heizwert wurde anhand von Versuchen aus dem Cone-Calorimeter zu 12 MJ/kg bestimmt.

Bild A 5.6 gibt den Vergleich der gemessenen Temperaturwerte mit den berechneten Temperaturwerten wieder. Auch hier wurden die Formeln entsprechend Anhang A5.1 verwendet. Obwohl die für die Berechnung angenommene Wärmefreisetzungsrates hierbei mit Fehlern behaftet ist, zeigt sich doch eine bemerkenswert gute Übereinstimmung

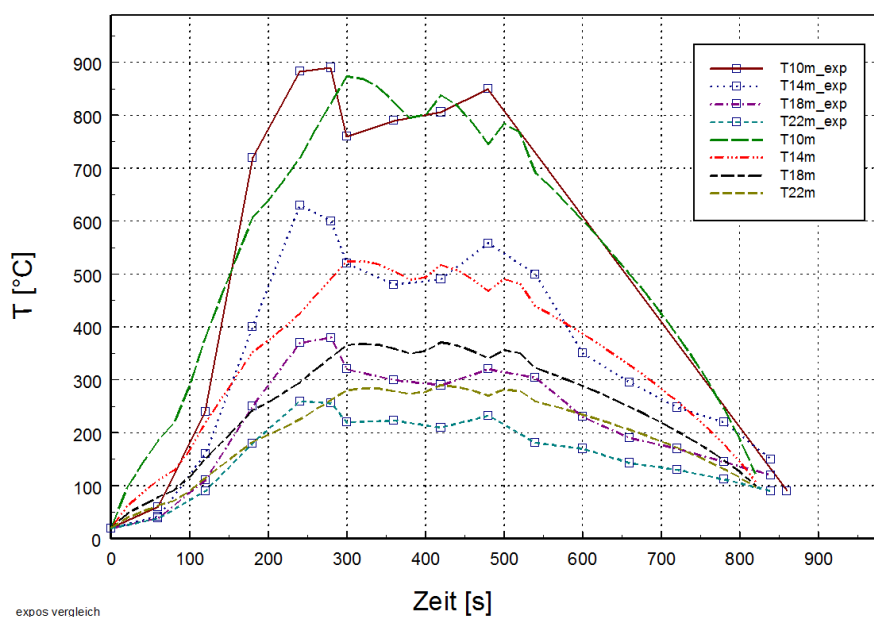


Bild A 5.6 Vergleich der Temperaturentwicklung in verschiedenen Höhen oberhalb des Brandherdes im Experiment und nach Berechnung

Aus diesen Vergleichen mit den Messwerten von Brandversuchen lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die Anwendung der vorgestellten Gleichungen ableiten. Die Vergleiche mit den experimentell bestimmten Temperaturwerten oder Temperaturverläufen zeigen, dass die berechneten Temperaturen auf der Plume-Achse keineswegs fiktiv sind, sie stellen die auftretenden Maximaltemperaturen in dem durch das Messraster gekennzeichneten Raumabschnitt dar. Da diese Raster durchaus einen Raumbereich von mehreren Kubikmetern abdecken, darf man sich diese Maximaltemperaturen auf keinen Fall punktförmig vorstellen.

Hinzu kommt, dass die obigen Einzelmesswerte (Tabelle A 5.5) selbst Mittelwerte über ein bestimmtes Messintervall darstellen, wobei die auftretenden Schwankungen auf die turbulente Struktur der Strömung im Plumbereich zurückzuführen sind. Bei der Auslegung von Bauteilen ist daher zu prüfen, ob mittlere Temperaturwerte oder die mit Hilfe der obigen Gleichungen berechenbaren lokalen Maximaltemperaturen herangezogen werden. Dies ist insbesondere bei Fachwerkstäben oder Unterspannungen, als Teil komplexer Tragkonstruktionen, ratsam. Die Verwendung von mittleren Temperaturwerten ist im Einzelfall zu begründen.

Eine große Anzahl von Vergleichsmöglichkeiten liefern auch Experimente, die in einer großen Halle der Underwriters Laboratories ausgeführt wurden [5.71]. Die Besonderheit liegt darin, dass ein ca. 30 m x 30 m großes Deckenfeld auf variable Höhen einstellbar ist. Das nachstehende Bild 5.10 zeigt einen Vergleich zwischen Experiment und Rechnung für den Versuch 4, der bei einer Deckenhöhe von 7,6 m und einer Wärmefreisetzungsrate von ca. 4 MW (im Maximum) durchgeführt wurde. Auch hier kamen die bereits genannten Gleichungen zum Einsatz. Im Gegensatz zu den bisherigen Vergleichen beinhaltet dieser aber auch einen Vergleich der Temperaturentwicklungen in unterschiedlichen Abständen zum Brandort. Dies kommt durch die in der Legende (Bild A 5.7) dargestellten Zahlen zum Ausdruck.

Die exakten Randbedingungen für die hier vorgestellten sind jeweils aus der angegebenen Literatur zu entnehmen.

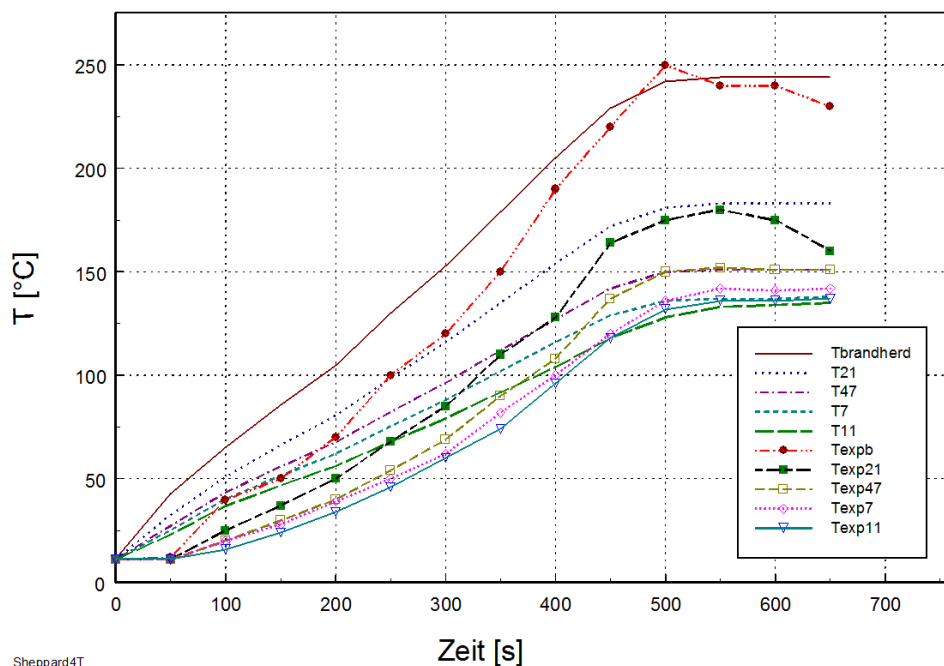


Bild A 5.7 Vergleich der Temperaturentwicklungen im Experiment und nach Berechnung in verschiedenen Entfernungen zum Brandort (2,1 m, 4,7 m, 7 m und 11 m)

A5.3.2 Beispiele und Experimente für Vergleichsrechnungen

Für die Bewertung von Modellen sind geeignete Experimente für vergleichende Berechnungen notwendig. Hinsichtlich der Experimente lassen sich leicht hohe Anforderungen hinsichtlich des Umfangs der Messergebnisse und der Reproduzierbarkeit formulieren, dies ist jedoch der Idealzustand. Bedauerlicherweise stehen solche Experimente, wenn überhaupt, dann nur in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung. Oftmals verfügt man nur über eine eingeschränkte Auswahl an Messergebnissen. Die Vergleichsrechnungen müssen sich dann auf diese Ergebnisse beschränken.

Neben diesen messtechnisch orientierten Kriterien gibt es aber noch weitere, z. B. die Aussagefähigkeit des Experiments im Hinblick auf die praktische Anwendung, d. h. die Häufigkeit mit der gleiche oder ähnliche Randbedingungen in der Praxis zur Beurteilung anstehen. Ein weiteres Kriterium besteht darin, ob die Experimente oder Beispiele geeignet sind, die Unterschiede in den Ergebnissen verschiedener Modelltypen hervorzubringen.

Im Folgenden wird daher der Versuch unternommen, eine erste Zusammenstellung solcher Experimente und Beispielrechnungen anzugeben. Dabei wurde hinsichtlich der Daten auf ein Minimum an Angaben geachtet:

- Geometrie,
- Zu- und Abluftöffnungen,
- Angaben zum Brennstoff und dem Brandverlauf,
- Angaben zum Temperaturniveau und
- Angaben zur Höhe der raucharmen oder rauchfreien Schicht.

Für die Bewertung von Atrien oder Hallen wurden zwei Brandexperimente ausgewählt.

Experiment 1

Das Experiment fand in einem Atrium mit den Abmessungen (L x B x H) 30 m x 24 m x 26,3 m statt, bei dem ein Poolbrand eine Brandleistung von 1,3 MW erzeugte [5.32]. Die Zuluftfläche betrug 3,2 m² und die RWA-Fläche in den seitlichen Umfassungswänden 6,4 m². Die Messungen bei diesem Brandversuch waren sehr umfangreich, sodass die Werte für Temperatur und rauchfreie Schicht in guter Genauigkeit vorliegen. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung sind in Bild A 5.8 dargestellt. Daraus folgt, dass die experimentellen Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben werden und die dargestellten Differenzen die Fehlerbandbreite markieren.

5 Modelle für die Brandsimulation

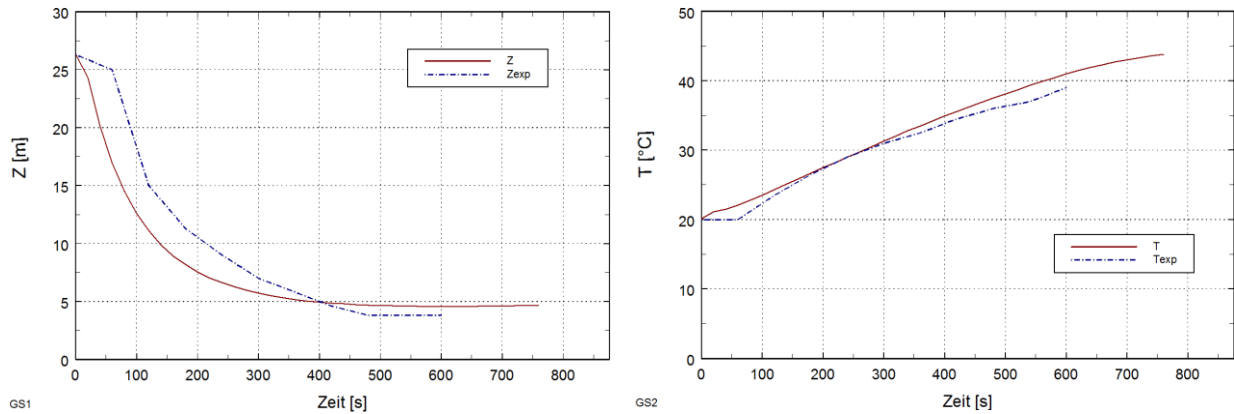


Bild A 5.8 Vergleich der Ergebnisse aus Experiment und nach Berechnung, links im Bild: rauchfreien Schicht, rechts im Bild: mittlere Rauchgastemperatur

Experiment 2

Das zweite Experiment fand in einem Flugzeughangar statt (90 m x 54,2 m x 15 m, L x B x H) [5.33], bei dem zwei unterschiedliche Brandverläufe untersucht wurden. Innerhalb dieses Raums erfolgte die Abtrennung eines Areals durch Rauchschränzen (20 m x 21 m), die bis auf eine Höhe von 12 m herabreichten. Aufgrund der leichten Dachwölbung entstand dadurch ein Rauchreservoir von 2,5 m - 3 m Höhe. Die Zulufffläche bei diesen Experimenten betrug 16 m² und die Rauchabzugsfläche im Dach 68 m². Dabei waren folgende Ergebnisse zu verzeichnen:

- Szenario 1 (4 MW): Temperatur 50 °C - 55 °C,
- Szenario 2 (36 MW): Temperatur 165 °C - 180 °C.

Leider erfolgte keine exakte Bestimmung der rauchfreien Schicht, die Beobachtung ergab jedoch, dass in beiden Fällen die Rauchgase innerhalb des Reservoirs verblieben. Die mit CFAST berechneten Werte sind in Bild A 5.9 dargestellt.

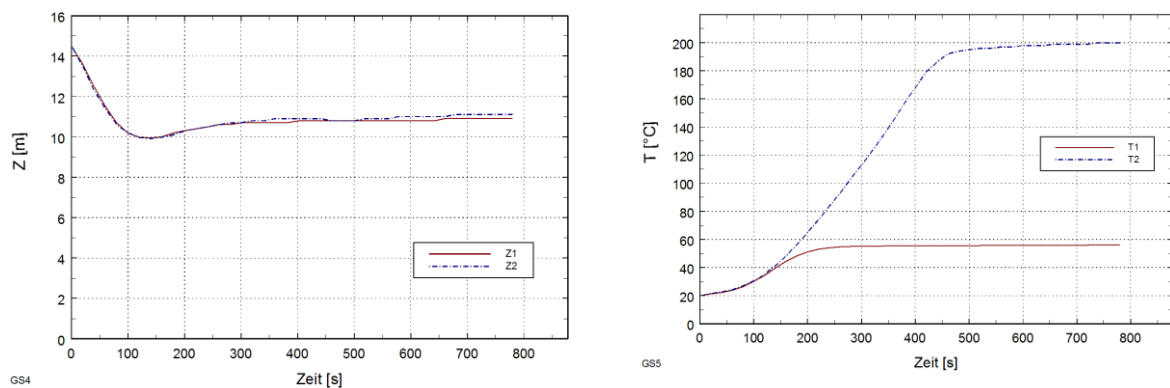


Bild A 5.9 Berechnung für die beiden Brandszenarien (4 MW und 36 MW), links im Bild: Dicke der rauchfreien Schicht (Z_1 , Z_2), rechts im Bild: Mittlere Rauchgastemperatur (T_1 , T_2)

Man erkennt, dass sich die berechneten Temperaturwerte an den gemessenen Obergrenzen befinden oder leicht darüber liegen. Hinsichtlich der Rauchgasschicht ist erkennbar, dass die Rauchgase bis zu einer Höhe unterhalb des Reservoirs reichen, d. h. die rauchfreie Schicht

ist etwas geringer als im Experiment. Damit befindet man sich für die Vorhersage auf der sicheren Seite.

Diese Beispiele lassen sich durch weitere ergänzen und sie zeigen, dass die Zonenmodelle bei diesen Randbedingungen mit begrenzte Flächen (s. o.) akzeptable Ergebnisse liefern.

Aus den bisher dokumentierten Erfahrungen lassen sich folgende systematische Anwendungsgrenzen ableiten: Anwendungsgrenzen von Zonenmodellen werden bei Räumen erreicht, bei denen die Verhältnisse der Ausdehnung in die drei Raumrichtungen bestimmte Werte unter- oder überschreiten. Weiterhin bei sehr hohen Räumen und bei Randbedingungen, bei denen Zuluft einflüsse oder sonstige dominierende Strömungen überwiegen. Für eine ausführliche Diskussion der Einschränkungen kann hier auf die entsprechenden Kapitel des Technical Reference Guide des Zonenmodells CFAST [5.75] verwiesen werden, welche diese Fragestellungen vorbildlich behandelt. Diese Einschränkungen lassen sich zum Teil aus den Grundannahmen für die verwendeten Submodelle ableiten (siehe Anhang). Beispielsweise verhindert die durch das verwendete Submodell beschriebene Überströmung in andere Räume eine Unterteilung in sehr kleine Zonen, da das Submodell dafür nicht geeignet ist [5.75].

Leider können exakte Abgrenzungen bisher nicht angegeben werden, da diesbezügliche Experimente fehlen. Die Anwendungsgrenzen können momentan nur über vergleichende Berechnungen angenähert werden. Dies wird anhand von zwei Beispielen demonstriert.

A5.4 Beispiel Validierung PRISME DOOR

A5.4.1 Durchgeführte Versuche

Die Versuche zur DOOR-Serie (1-5) des OECD PRISME Projekts [5.81] wurden in den Räumen „Room 1“ und „Room 2“ der Versuchseinrichtung DIVA durchgeführt. Diese Versuchseinrichtung ist in der Anlage JUPITER untergebracht, die ein Volumen von 2.630 m³ besitzt. Bild A 5.10 zeigt die räumlichen Gegebenheiten, in denen die Versuche durchgeführt wurden. Ausgewertet wurden die Versuche 3, 4 und 5 der Versuchsserie (PRS_D3, PRS_D4, und PRS_D5).

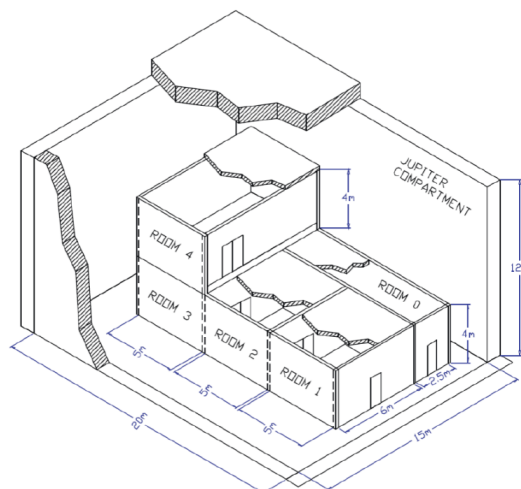


Bild A 5.10 Ansicht der Versuchseinrichtung DIVA

Jeder der unteren, quaderförmigen Räume besitzt bei den lichten Abmessungen 6 m x 5 m x 4 m ein Volumen von 120 m³ und ist an ein komplexes Ventilationssystem angeschlossen, welches die Räume gesteuert über Inlet (Zuluft)- und Exhaust (Abluft-) Kanäle bzw. entlüftet. Für die DOOR-Serie waren die Türen zwischen den zwei am Versuch beteiligten Räumen (Room 1 und Room 2) geöffnet. Die Türöffnungen haben je eine Abmessung von 0,8 m x 2 m und sind in der Mitte der Trennwände angeordnet.

Die Luftwechselrate in den Versuchen PRS_D3 und PRS_D5 betrug 4,7 1/h bzw. 560 m³/h für beide Räume – Brand- und Zielraum –; im Versuch PRS_D4 lag der Wert bei 8,4 1/h bzw. 1.000 m³/h. Als Brandquelle wurde eine rechteckige Fläche in etwa entsprechend der im Versuch verwendeten Poolgröße modelliert (siehe jeweils Tabelle A 5.6). Die Reaktionsparameter und weitere Details können [5.83] entnommen werden.

Tabelle A 5.6 Poolgröße und Luftwechselrate während der PRISME-DOOR Versuche PRS_D3, PRS_D4 und PRS_D5

Versuch	Poolgröße	Luftwechselrate
PRS_D3	0,4 m ²	4,7 1/h bzw. 560 m ³ /h
PRS_D4	0,4 m ²	8,4 1/h bzw. 1.000 m ³ /h
PRS_D5	1 m ²	4,7 1/h bzw. 560 m ³ /h

Für die „offenen“ Vergleichsrechnungen waren die in Versuchen ermittelten Zeitverläufe der Wärmefreisetzungsrate (HRR) bekannt. Als Verbrennungswärme (HOC) wurde ein Wert von 45 MJ/kg verwendet. Bild A 5.11 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate für die Simulationen.

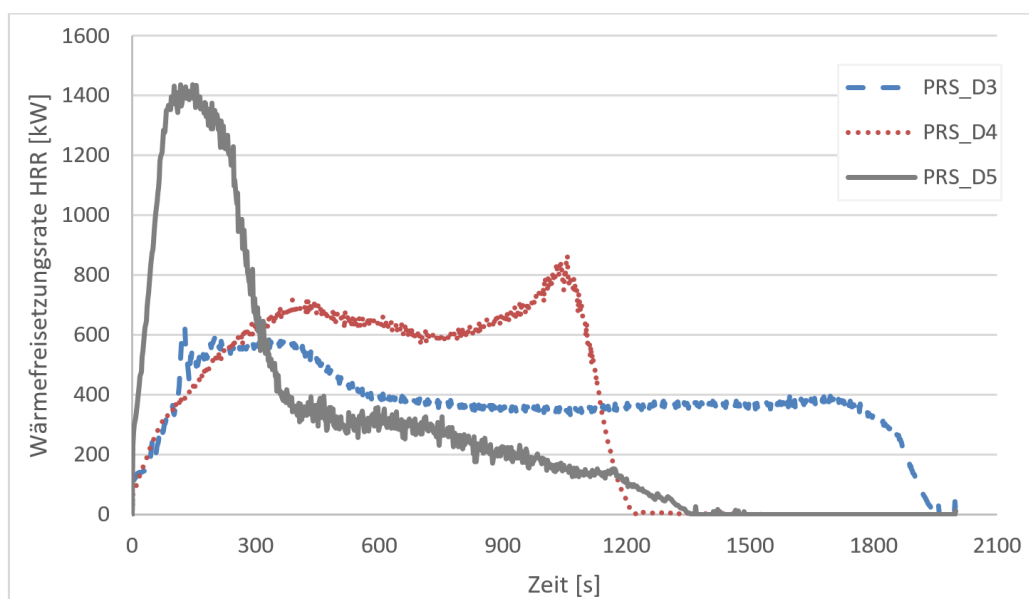


Bild A 5.11 Vorgegebene Zeitverläufe der Wärmefreisetzungsrate (HRR) für die Versuche PRS_D3, PRS_D4 und PRS_D5 – offene Simulation

A5.4.2 Durchgeführte Simulationen

Die nachfolgende Tabelle A 5.7 zeigt die Simulationen, die mit dem Fire Dynamics Simulator (FDS) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Simulationen mit der FDS Version 4 [5.84], Version 5 [5.85] und Version 6 [5.86] werden in den anschließenden Abschnitten vorgestellt und diskutiert.

Tabelle A 5.7 Durchgeführte Simulationen

Versuch	Typ	Kommentar	
PRS_D3 PRS_D4 PRS_D5	Offen	HRR mit IRSN-Vorschlag („mechanical method“, HOC = 45 MJ/kg) ermittelt; Volumenströme (Inlet/Exhaust) als Randbedingung vorgegeben	FDS Version 4.0.7; FDS Version 5.5.3 und FDS Version 6.0.7
HOC: Heat of Combustion (Verbrennungswärme)			

Das Brandsimulationsmodell FDS wurde ohne Änderungen der Voreinstellungen der jeweiligen Versionen eingesetzt. Für die Berechnungen wurden allerdings die Temperaturen zum Zeitpunkt $t = 0$ im Versuch gemessen und wurden als Starttemperaturen übernommen. Objekte und Umfassungsbauteile wurden thermisch berücksichtigt und für die eindimensionale Wärmetransferrechnung wurden die Wärmeleitfähigkeiten und die spezifischen Wärmen, soweit vorhanden, temperaturabhängig angesetzt. Für die Simulation der Gasphase wurde ein 10 cm Gitter eingesetzt. Überprüfungen mit feineren Gittern haben keine wesentliche Änderung der berechneten Größen ergeben. Die Berechnung der Wärmeleitung in feste Stoffe erfolgt in einem zur Gasphase unabhängigen deutlich feineren Gitter.

A5.4.3 Modellaufbau

Bild A 5.12 zeigt das verwendete Modell des Brand- und des Zielraums mit dem Flüssigkeitspool und die von oben in die Räume eingebrachten Zu- und Abluftkanäle. Ferner sind die untersuchten sicherheitsrelevanten, kraftwerksspezifischen Objekte an den Wänden im oberen und unteren Bereich der Räume zu erkennen. Die analytischen Kabel (PVC-Barren) sind dabei in roter und die realen Kabel in grüner Farbe als Quader dargestellt.

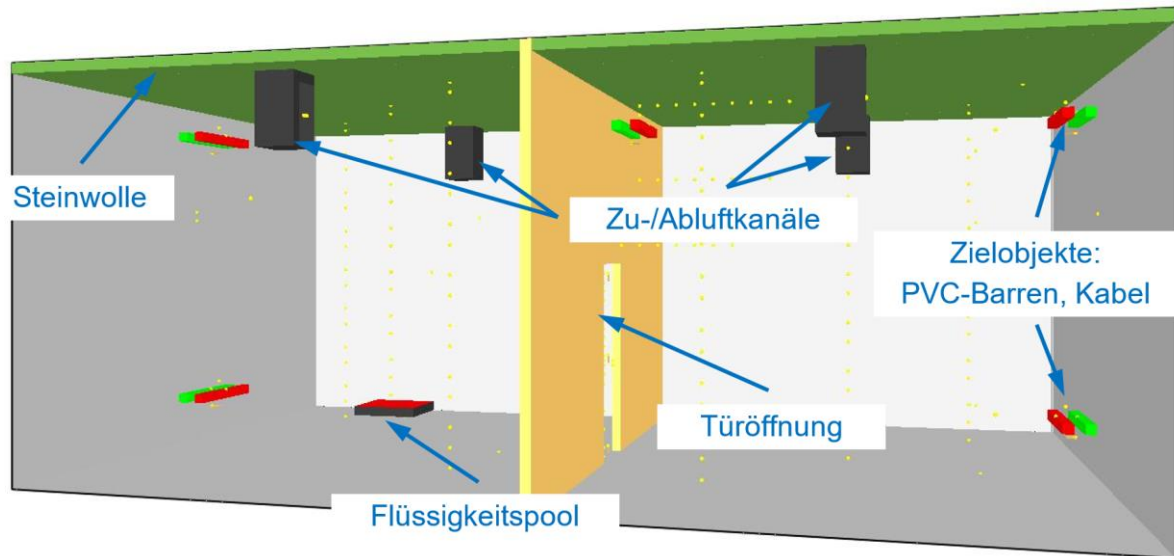


Bild A 5.12 Modell des Brand- (links, L1) und des Zielraums (rechts, L2)

In Tabelle A 5.8 werden die untersuchten und ausgewerteten Messgrößen aufgeführt. Obwohl auch Druckmessungen durchgeführt wurden, waren die Ergebnisse sowohl auf der Versuchseite, als auch auf der Simulationsseite mit Fehlern behaftet oder unrealistisch, so dass diese Größe nicht ausgewertet wurde.

A5.4.4 Bewertungsgrundsätze

Eine Bewertung der Ergebnisse der DOOR Serie erfolgt auf Grundlage der Ansätze aus Kapitel 5.4.2. Die Bewertung der Genauigkeit von numerischen Vorhersagen wird auf Grundlage der gewichteten kombinierten erweiterten Unsicherheiten U_{CW} der experimentellen und numerischen Messgrößen durchgeführt. Die ausgewerteten Messgrößen und die Festlegungen für das untersuchte Experiment PRISME DOOR $U_{CW, PRS}$ zeigt Tabelle A 5.8. Für die Auswertung wurde eine Grenze der Daten in Bezug auf die Bewertungsgrößen PEAK und NED angenommen. Es wurden Daten von der weiteren Bewertung ausgenommen, die für PEAK außerhalb des Intervall $[-1;1]$ und für NED außerhalb des Intervalls $[0;1]$ lagen. Für diese Untersuchung sollen Daten ausgeschlossen werden, bei denen ggf. entweder Unstimmigkeiten in der experimentellen Durchführung oder bei der Modellbildung im CFD-Brandsimulationsmodell vorliegen.

Tabelle A 5.8 Ausgewertete Messgrößen und angenommene Unsicherheiten für PRISME DOOR, $U_{CW, PRS}$, Anzahl ausgewerteter Größen

Kürzel	Ausgewertete Messgrößen	$U_{CW, PRS}$ (%)	Anzahl ausgewertete Größen
CO	Kohlendioxidkonzentration	9	73
CO2	Kohlenmonoxidkonzentration	9	58

Fortsetzung Tabelle A 5.8

FLR	Wärmestromdichte Radiativ	20	106
FLT	Wärmestromdichte Total	20	197
O2	Sauerstoffkonzentration	9	74
TG	Temperatur Gasphase	15	1446
TCA	Temperatur analytische Kabel	14	135
TCR	Temperatur reale Kabel	14	90
TP	Temperatur Oberflächen	14	168
V	Geschwindigkeit	20 *)	114
*) Annahme, wurde in [5.82] nicht ausgewertet			

A5.4.5 Ergebnisse der Validierung

Bild A 5.13 zeigt eine Übersichtsdarstellung aller ausgewerteten Größen für die Versuche PRS_D3, PRS_D4 und PRS_D5 in Form eines Scatterplots der PEAK Werte über den NED Werten, unterschieden nach den Version FDS 4, FDS 5 und FDS 6. In dieser Darstellung ist erkennbar, dass die Fälle, in denen die Simulationen teilweise deutlich höher als die experimentellen Werte ausfallen, überwiegend der Version FDS 4 zuzuordnen sind. Es ist erkennbar, dass die Ergebnisse von FDS 5 und FDS 6 unabhängig von den Versuchen große Übereinstimmungen aufweisen, die Ergebnisse der Index-Werte für FDS 4 von diesen dagegen teilweise abweichen.

Mit A ist im Weiteren ein Bereich ausgewiesen, in dem die PEAK Werte die bewertete Unsicherheit U_{CW} nicht überschreiten. Für die NED Werte wurde ohne weitere Begründung ein doppelt so hoher Wert für die bewertete Unsicherheit angenommen. Für den Bewertungsbereich B wurde diese Grenze jeweils um den Faktor 2 vergrößert. Im Bewertungsbereich C liegen entsprechend der Darstellung 100 % der ausgewerteten Größen, dies entspricht (definitionsgemäß) einem Anteil von $C = 1,00$. Die Anteile der Werte A, B, die in dem jeweiligen Bewertungsbereich A bzw. Bewertungsbereich B liegen, werden zusätzlich (oben links) im Bild dargestellt.

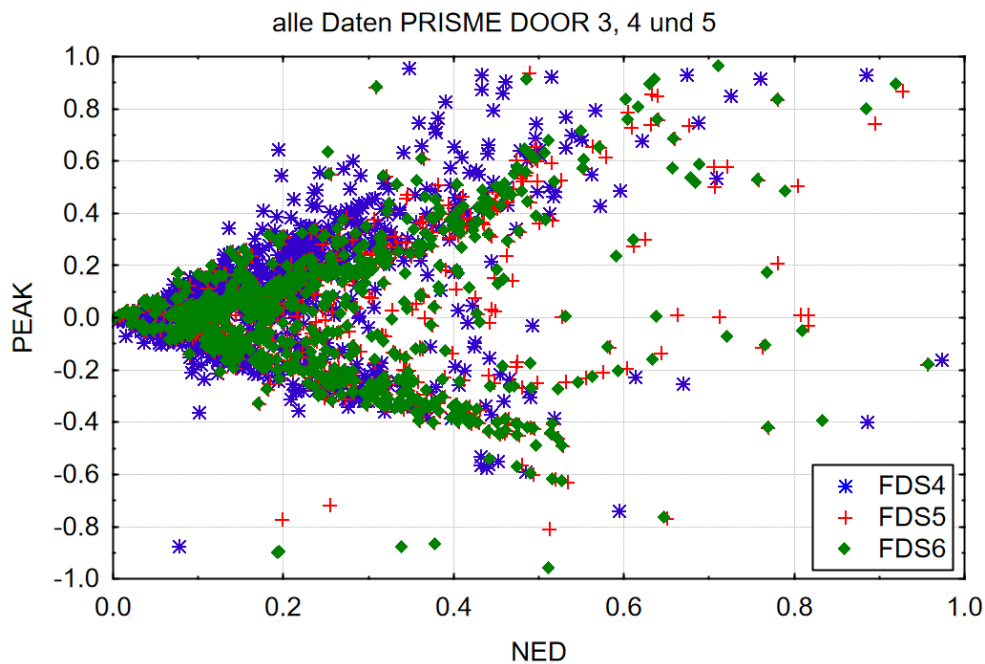


Bild A 5.13 PEAK über NED (alle Größen) für PRS_D3, PRS_D4 und PRS_D5 unterschieden nach den Versionen FDS 4, FDS 5 und FDS 6

In Bild A 5.14 ist eine zusammengefasste Darstellung der Häufigkeiten gegeben, mit der die Anteile A und B der Bewertungsgrößen für Versuch PRS_D3, PRS_D4 und PRS_D5 vorliegen. Hohe Häufigkeiten der Anteile entsprechen einer großen Übereinstimmung der experimentellen und numerisch ermittelten Daten in Bezug auf die Bewertungsgrößen PEAK und NED.

Auffällig gut können die Sauerstoffkonzentration (O₂) und die Kohlendioxidkonzentrationen (CO₂) wiedergegeben werden. Auch die Ergebnisse für die Temperaturen an den Oberflächen der Umfassungsbauteile (TP) sind vergleichsweise gut. Bei der Kohlenmonoxid-Konzentration (CO) und bei den Strahlungsgrößen sind die Medianwerte größer und die Schwankungen deutlich größer.

Insgesamt sind die PEAK Werte der meisten Untersuchungsgrößen unabhängig von der verwendeten Version von FDS höher, als die entsprechenden Werte aus den Experimenten. Dies ist nicht der Fall bei den Temperaturen der realen (TCR) und der analytischen Kabel (TCA), hier werden die experimentellen Werte vom CFD-Modell unterschätzt. Dieser Fall liegt auch für die Kohlenmonoxid-Werte (CO) unabhängig von der Version von FDS vor.

In Bezug auf die Version ergeben sich beim Anteil A für FDS 4 bei den Sauerstoffwerten (O₂), den Kohlenmonoxid-Werten (CO), den Gastemperaturen (TG) und den radiativen Wärmestromdichten (FLR) niedrigere Anteile als bei den Versionen FDS 5 und FDS 6. Bei diesen beiden Versionen sind die Übereinstimmungen der Vergleichsgrößen besser. In Bezug auf den Anteil B, im Grunde also für größere Fehlergrenzen, ergeben sich mit Ausnahmen der Größe Kohlenmonoxid (CO) für alle Messgrößen höhere Werte für die Anteile für die Version FDS 4.

5 Modelle für die Brandsimulation

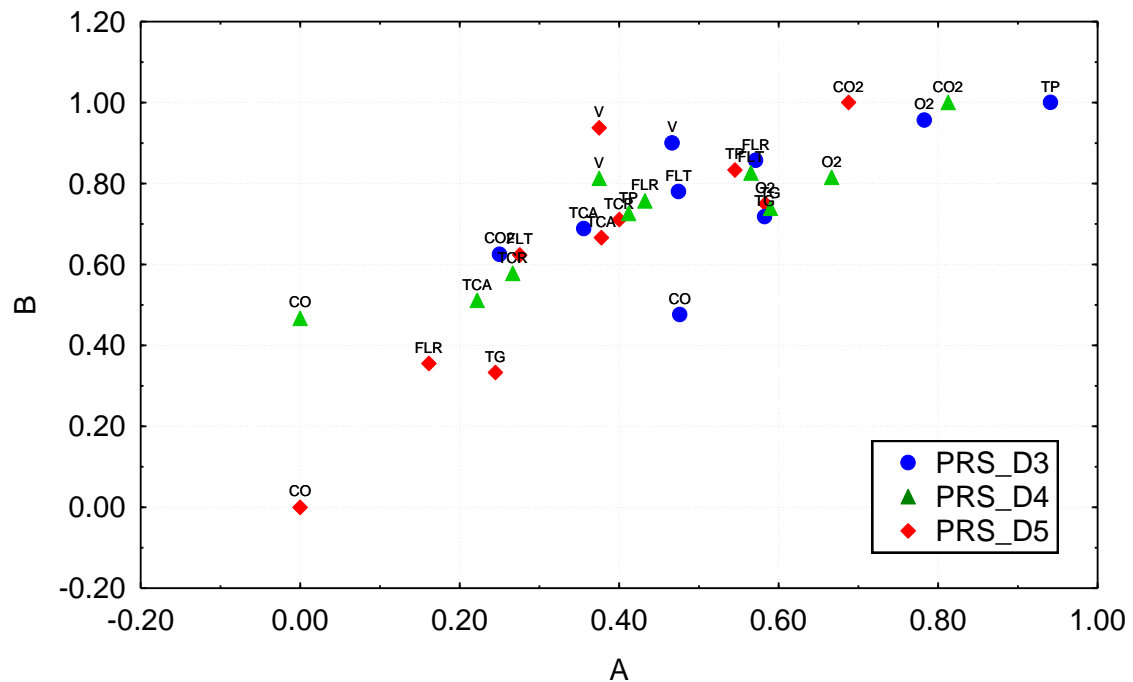


Bild A 5.14 Zusammengefasste Darstellung der Anteile A und B der Bewertungsgrößen, Versuch PRS_D3, PRS_D4 und PRS_D5

Zusammenfassend ist erkennbar, dass eine Abhängigkeit der Übereinstimmung der Ergebnisse hinsichtlich der Versuchsrandbedingungen besteht. Für den Versuch PRS_D3 stimmen bei praktisch allen Größen die Simulationsdaten besser mit den experimentellen Daten überein, als für den Versuch PRS_D4 und PRS_D5. Im Versuch PRS_D3 lag die Wärmefreisetzungsrates bei maximal 0,6 MW und die Ventilationsrate bei 4,7 Luftwechselln je Stunde, bei PRS_D4 bei 0,8 MW und 8,4 Luftwechselln je Stunde und bei PRS_D5 bei 1,4 MW und 4,3 Luftwechselln je Stunde.

6 BRANDSCHUTZTECHNISCHE NACHWEISE VON BAUTEILEN UND TRAGWERKEN

6.1 Einleitung

Mit den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6 und 9 [6.1] bis [6.7] stehen Bemessungsverfahren zur Verfügung, mit denen individuelle Brandschutznachweise für Einzelbauteile sowie für Teil- und Gesamttragwerke in beliebigen Nutzungen möglich sind. Neben der Brandbeanspruchung durch nominelle Temperaturzeitkurven wie der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) oder der Außenbrandkurve wird mit den Eurocodes auch die Bemessung mit Naturbrandmodellen ermöglicht, die im Vergleich zur ETK ein realistischeres Abbild eines Realbrandes (Schwelbrandphase, Vollbrand, Abkühlphase) darstellen.

Die brandschutztechnischen Bemessungsregeln finden sich jeweils im Teil 1-2 der Eurocodes, die im Weiteren mit der Kurzform EC 1-1-2 (für DIN EN 1991-1-2), EC 2-1-2 (für DIN EN 1992-1-2) usw. bezeichnet werden. In DIN 4102-4 sind ergänzend zu den Bemessungsregeln der Eurocode-Brandschutzteile Festlegungen und Regelungen für z. B. Ausführungsdetails, Trockenbauwände, Porenbetonbauteile, historische Bauweisen, Sonderbauteile und leichte Trennwände enthalten, die nicht in den Eurocodes geregelt sind.

In EC 1-1-2 werden die Bemessungsregeln für die Einwirkungen im Brandfall festgelegt. Da der Brandfall eine außergewöhnliche Bemessungssituation ist, können die mechanischen Einwirkungen im Vergleich zur Kaltbemessung reduziert werden. Die thermischen Einwirkungen auf die Bauteile bzw. das Tragwerk können mit Hilfe von sog. nominellen Temperaturzeitkurven bzw. mit Naturbrandmodellen ermittelt werden.

Die Erwärmung der Bauteile hat zur Folge, dass sich deren Widerstand infolge der thermisch bedingten Abminderung der Festigkeitsbeiwerte reduziert.

Im Industriebau können Bauteile mit Hilfe des Berechnungsverfahrens nach DIN 18230 „Baulicher Brandschutz im Industriebau“ für eine risikogerechte Brandbeanspruchung bemessen werden (siehe Kapitel 6.9).

6.2 Nachweise nach den Brandschutzteilen der Eurocodes

6.2.1 Allgemeines

Für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Bauwerken des konstruktiven Ingenieurbaus (Eurocode 2 bis 6 und 9) wird neben dem Brandschutzteil des baustoffbezogenen Eurocodes zusätzlich der baustoffübergreifende Brandschutzteil des Eurocodes 1 mit Angaben zu Lastannahmen und Brandeinwirkungen benötigt. Im Dezember 2010 wurden die Brandschutzteile der Eurocodes 1 bis 5, 7 und 9 Teil 1-2 als DIN EN-Normen (DIN EN 199x-1-2) herausgegeben. Die Veröffentlichung der Erstfassung der Nationalen Anhänge erfolgte mit Ausnahme des EC 6-1-2 und des EC 9-1-2 ebenfalls im Dezember 2010. Die Veröffentlichung des Eurocodes 6-1-2 folgte im April 2011 als DIN EN 1996-1-2. Der dazugehörige Nationale Anhang wurde im Juni 2013 veröffentlicht:

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

EC 1-1-2	DIN EN 1991-1-2	Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke [6.1]
EC 2-1-2	DIN EN 1992-1-2	Tragwerksbemessung für Stahlbeton- und Spannbetontragwerke [6.2]
EC 3-1-2	DIN EN 1993-1-2	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten [6.3]
EC 4-1-2	DIN EN 1994-1-2	Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton [6.4]
EC 5-1-2	DIN EN 1995-1-2	Bemessung und Konstruktion von Holzbauten [6.5]
EC 6-1-2	DIN EN 1996-1-2	Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten [6.6]
EC 9-1-2	DIN EN 1999-1-2	Berechnung und Bemessung von Aluminiumtragwerken [6.7]

Zurzeit erfolgt eine Überarbeitung der Eurocodes. Für die Brandschutzteile von EC 1 bis EC 5 liegen bereits Entwürfe vor. Grundsätzlich wird in diesem Kapitel auf die bestehenden bauaufsichtlich eingeführten Teile der Eurocodes verwiesen. Soweit wesentliche Änderungen in den brandschutztechnischen Nachweisen der überarbeiteten Eurocodes vorgesehen sind, werden sie in der vorliegenden Ausgabe des Leitfadens vorgestellt. Der Abschluss der Überarbeitung und die bauaufsichtliche Einführung der überarbeiteten Eurocodes sind nicht vor 2025 zu erwarten.

Die Bemessungsregeln in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 bis 6 und 9 gelten nur für die im Anwendungsbereich der Norm genannten Baustoffe und Baustoffgütern. Sollen andere Baustoffe oder Baustoffgütern verwendet werden, z. B. ultrahochfester Beton mit einer Zylinderdruckfestigkeit größer 100 N/mm^2 , muss deren brandschutztechnische Eignung durch Brandversuche nachgewiesen werden.

Auf die brandschutztechnische Bemessung nach Eurocode 9 Teil 1-2 wird im Folgenden nicht näher eingegangen. Die brandschutztechnische Bemessung von Aluminiumbauteilen hat im Hochbau untergeordnete Bedeutung. Grundsätzlich sind die Nachweise in Eurocode 9 Teil 1-2 mit denen des Eurocodes 3 Teil 1-2 (Stahlbau) vergleichbar.

6.2.2 Nationale Anhänge (NA)

Bei Anwendung der Eurocodes DIN EN 1991-1-2 bis DIN EN 1996-1-2 und DIN EN 1999-1-2 müssen die sogenannten „Nationalen Anhänge“ (NA) [6.8] beachtet werden. Die Eurocodes enthalten alternative Verfahren und Werte sowie Empfehlungen für Klassen mit Hinweisen, an welchen Stellen nationale Festlegungen möglicherweise getroffen werden müssen. Im Nationalen Anhang werden die national festzulegenden Parameter bzw. nationale Festlegungen sowie die Anwendung informativer Anhänge für das jeweilige Ausgabeland definiert. National festzulegende Parameter bzw. Nationale Festlegungen werden in den Eurocodes (DIN EN) durch entsprechende Anmerkungen gekennzeichnet. Sie sind nur als Anhalt zu verstehen, vor ihrer Übernahme in eine brandschutztechnische Bemessung muss im NA ihre nationale Festlegung geprüft werden.

6.2.3 Bauaufsichtliche Einführung

Die Eurocodes und ihre zugehörigen Nationalen Anhänge sind als Technische Baubestimmungen in der MVV TB übernommen und in den Bundesländern bauaufsichtlich eingeführt worden. Der aktuelle Stand kann auf der Informationsseite der Bauministerkonferenz unter www.is-argebau.de abgerufen werden. Für die konstruktive Ausführung, Sonderbauteile und historische Bauweisen sowie raumabschließende Bauteile wie leichte Trennwände ist die DIN 4102-4 als technische Baubestimmung anzuwenden.

Grundsätzlich ist die brandschutztechnische Bemessung nach den Brandschutzteilen der Eurocodes zu führen. Ausschließlich für Nachweise, die in den Brandschutzteilen der Eurocodes nicht geregelt sind, kann die Bemessung nach DIN 4102 Teil 4 geführt werden.

6.2.4 Bemessungsverfahren

Die Eurocodes sehen insgesamt drei verschiedene Nachweisebenen für die Bemessung der Standsicherheit von Bauteilen und Tragwerken im Brandfall vor:

- Ebene 1: Tabellarische Bemessungsverfahren
- Ebene 2: Vereinfachte Bemessungsverfahren
- Ebene 3: Erweiterte Bemessungsverfahren

Es ist zu beachten, dass in den verschiedenen Teilen der Eurocodes die Nachweisverfahren nicht unter einheitlichen Begriffen geführt werden, in den überarbeiteten Teilen jedoch die vorgenannten einheitlichen Begriffe verwendet werden.

Das von Brandversuchen abgeleitete Tabellarische Bemessungsverfahren liegt im Allgemeinen auf der sicheren Seite. Wirklichkeitsnäher wird das Tragverhalten durch die aufwändigeren vereinfachten und erweiterten Bemessungsverfahren wiedergegeben. Die Wahl des angemessenen Verfahrens hängt von den benötigten Aussagen und der geforderten Genauigkeit ab. Die Möglichkeiten der Kombinationen der Nachweisverfahren wird im Ablaufdiagramm in Bild 6.1 dargestellt. Die Brandschutzteile der Eurocodes unterscheiden zwischen Nachweisen für Gesamttragwerke, Tragwerksausschnitte und Einzelbauteile. Der brandschutztechnische Nachweis eines Gesamttragwerks muss die maßgebende Versagensart unter Brandeinwirkung erfassen und dafür die temperaturabhängigen Veränderungen der Baustoffe und der Bauteilsteifigkeiten sowie die Wirkung der thermischen Ausdehnungen und Verformungen berücksichtigen. Für diese Nachweisform sind im Prinzip nur die erweiterten Bemessungsverfahren (6.5.3) geeignet. Für die Analyse von Teilen des Tragwerks (Tragwerksausschnitte) und von Einzelbauteilen kommen in der Regel die vereinfachten Bemessungsverfahren (6.5.2) und die Tabellarischen Bemessungsverfahren (6.5.1) zum Einsatz.

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

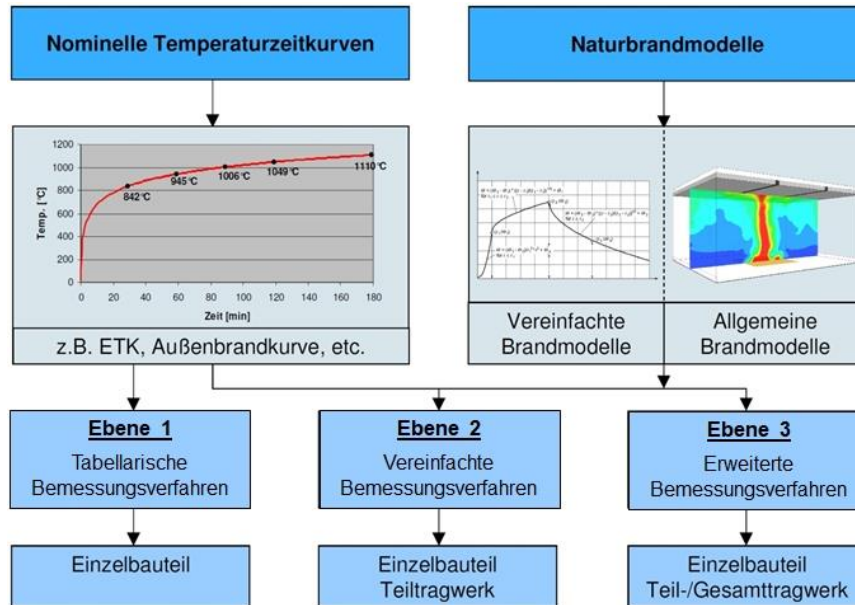


Bild 6.1 Ablaufdiagramm brandschutztechnische Nachweisverfahren nach Eurocode

6.3 Einwirkungen im Brandfall

6.3.1 Vorgehensweise

Der brandschutztechnische Nachweis wird in der Regel getrennt in einer thermischen und einer mechanischen Analyse durchgeführt.

- Im Rahmen der thermischen Analyse werden die Temperaturen im Bauteilquerschnitt berechnet. Dabei wird von den Heißgastemperaturen im Brandraum ausgegangen, die als thermische Einwirkungen nach Eurocode 1 Teil 1-2, Abschnitt 5 vorgegeben werden. Die Kapitel 4 und 5 des Leitfadens enthalten hierzu hilfreiche ergänzende Informationen. Bei der Berechnung der Temperaturen im Bauteilquerschnitt müssen die temperaturabhängigen thermischen Materialkennwerte des Bauteilquerschnitts und – sofern vorhanden – der Schutzschichten berücksichtigt werden.
- Im Rahmen der mechanischen Analyse werden das Trag- und teilweise auch das Verformungsverhalten der brandbeanspruchten Bauteile berechnet. Dabei müssen auf der Einwirkungsseite die Einflüsse aus der Belastung sowie gegebenenfalls behinderten thermischen Verformungen (Zwangkräfte und -momente) und aus nichtlinearen geometrischen Einflüssen berücksichtigt werden. Auf Seiten des Bauteilwiderstandes müssen die Einflüsse aus dem thermo-mechanischen Baustoffverhalten und den thermischen Dehnungen berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass das Hochtemperaturmaterialverhalten abhängig von der Aufheizrate sein kann und sich in der Abkühlphase ggf. abweichend verhält, s. hierzu Hinweise in Kapitel 6.5.3.2. Das Tragverhalten nach dem Abkühlen des Tragwerks, die sog. Resttragfähigkeit im wiedererkalteten Zustand, braucht bei der Brandschutzbemessung nicht berücksichtigt zu werden.

6.3.2 Thermische Einwirkungen

Die thermischen Einwirkungen auf Bauteile werden in Eurocode 1 Teil 1-2, Abschnitt 5.1 durch den Netto-Wärmestrom $[\text{W}/\text{m}^2]$ auf die Oberfläche des Bauteils gegeben, der sich gemäß Gleichung (6.1) aus einem konvektiven Anteil und einem radiativen Anteil zusammensetzt.

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (6.1)$$

mit:

$\dot{h}_{\text{net,c}}$ konvektiver Anteil des Netto-Wärmestroms nach Gleichung (6.2),

$\dot{h}_{\text{net,r}}$ radiativer Anteil des Netto-Wärmestroms nach Gleichung (6.3).

Der konvektive Anteil des Netto-Wärmestroms wird berechnet mit:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (6.2)$$

wobei

α_c Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

θ_g Heißgastemperatur in der Umgebung des Bauteils $[\text{°C}]$.

Für die Einheits-Temperaturzeitkurve und die Außenbrandkurve kann nach Eurocode 1 Teil 1-2 Abschnitt 3.2 $\alpha_c = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gesetzt werden. Für die Hydrokarbon-Brandkurve wird $\alpha_c = 50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen. Auf der brandabgekehrten Seite von trennenden Bauteilen sollte der konvektive Anteil des Netto-Wärmestroms mit $\alpha_c = 4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bestimmt werden. Für α_c sollte vereinfacht $\alpha_c = 9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt werden, wenn angenommen wird, dass er die Wärmeübertragung durch Strahlung mit abdeckt.

Der Netto-Wärmestrom durch Strahlung wird bestimmt durch:

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_{\text{res}} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (6.3)$$

mit

Φ Faktor zur Berücksichtigung von Abschattungen [-],

$\varepsilon_{\text{res}} = \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m$: resultierender Emissionsgrad [-],

ε_f Emissivität des Brandes [-] (s. Tab. 6.1),

ε_m Emissivität der Bauteiloberfläche [-] (s. Tab. 6.1),

θ_r wirksame Strahlungstemperatur des Brandes $[\text{°C}]$,

θ_m Oberflächentemperatur des Bauteils $[\text{°C}]$,

$5,67 \cdot 10^{-8}$ Stefan-Boltzmann-Konstante $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$.

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

In der Regel darf vereinfachend der Faktor $\Phi = 1,0$ und die Strahlungstemperatur Θ_r gleich der Heißgastemperatur θ_g gesetzt werden.

Tabelle 6.1 Emissionsgrad des Brandraums ε_f und der Bauteiloberfläche ε_m

Brandschutzteil der Eurocodes	Emissionsgrad [-]		
	Brandraum ε_f	Bauteiloberfläche ε_m	resultierend ε_{res}
1, 6	1,0	0,8	0,80
2, 4	1,0	0,7	0,70
3	1,0	0,7*) ***)	0,70
5	1,0	0,8	0,80
9	1,0	0,3**)	0,30

*) Nicht-rostender Stahl: $\varepsilon_m = \varepsilon_{res} = 0,4$

**) Für beschichtete und verdeckte (z. B. verrußte) Oberflächen: $\varepsilon_m = \varepsilon_{res} = 0,7$

***) Für verzinkte Stähle wird auf Kapitel 6.7.7 verwiesen

Gemäß EC 1-1-2 sollte bei der Anwendung von Naturbrandmodellen nach EC 1-1-2 Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2 der Wärmeübergangskoeffizient zu $\alpha_c = 35 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ gesetzt werden. In [6.9] wurden Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Emissivität der Heißgase in Abhängigkeit vom Brandverlauf Werte zwischen 0,8 und 1,0 annehmen kann. Die Werte können aufgrund der großen lokalen Streuung im natürlichen Brand, der unterschiedlichen Anordnung des Bauteils zu den Flammen, der unterschiedlichen Ausführung der Bauteiloberfläche und der unterschiedlichen Dichte der verrauchten Heißgasschicht stark variieren.

Für die Berechnung der thermischen Einwirkung infolge natürlicher Brände wird deshalb vorgeschlagen, die in EC 1-1-2 angegebenen Werte der Emissivität für standardisierte Temperaturzeitkurven näherungsweise auch für natürliche Brände anzuwenden.

Nominelle Temperaturzeitkurven

In EC 1-1-2 Abschnitt 3.2 werden verschiedene standardisierte Temperaturzeitkurven zur Beschreibung der Heißgastemperatur θ_g als Funktion der Branddauer t [min] vorgegeben. Für die Heißgastemperatur θ_g kann die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach Gl. (6.4), die Hydrokarbon-Brandkurve nach Gl. (6.5) oder die Außenbrandkurve nach Gl. (6.6) angenommen werden:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.4)$$

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.5)$$

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.6)$$

Die Hydrokarbon-Brandkurve gibt die Entwicklung der Heißgastemperaturen bei Flüssigkeitsbränden wieder, sie wird für die brandschutztechnische Bemessung von Hochbauten in der Regel nicht angewendet. Die Außenbrandkurve darf zum Nachweis des Raumabschlusses bei nichttragenden Außenwänden und aufgesetzten Brüstungen als Brandbeanspruchung von außen angesetzt werden. Sie entspricht der abgeminderten ETK nach DIN 4102 Teil 3 [6.10].

Naturbrandmodelle

Eurocode 1 Teil 1-2 unterscheidet zwischen vereinfachten und allgemeinen Naturbrandmodellen. Bei den vereinfachten Brandmodellen handelt es sich um Näherungsverfahren, mit denen in einer einfachen Handrechnung bzw. Tabellenkalkulation der Temperaturzeitverlauf eines natürlichen Brandes in Abhängigkeit der wesentlichen physikalischen Eingangsgrößen wie Brandlastdichte und Ventilationsbedingungen berechnet werden kann [6.11].

Bei Verwendung eines Naturbrandmodells ist die Temperaturberechnung gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 Abschnitt 2.4 für die gesamte Branddauer des Brandes einschließlich der Abkühlphase durchzuführen.

Allgemeine Brandmodelle berücksichtigen über iterative Verfahren die Gaseigenschaften sowie den Massen- und Energieaustausch zwischen bestimmten Kontrollvolumina. Entsprechend dem Detaillierungsgrad unterscheidet man

- Ein-Zonen Modelle, die von einer gleichmäßigen, zeitabhängigen Temperaturverteilung im Brandabschnitt ausgehen,
- Zwei-Zonen-Modelle, die von einer oberen Heißgasschicht und unterer Kaltgasschicht mit jeweils zeitabhängiger Schichtdicke und gleichmäßiger zeitabhängiger Temperatur ausgehen,
- CFD-Modelle, die mit den Verfahren der Fluid-Dynamik die Temperaturentwicklung in einem Brandabschnitt in Abhängigkeit von Ort und Zeit berechnen.

Die Modelle und ihre Eigenschaften sind in Kapitel 5 beschrieben.

Grundlage für die Naturbrandmodelle sollte ein reales Brandszenario mit dem zugehörigen Bemessungsbrand gemäß Kapitel 4 des Leitfadens sein. Der Bemessungsbrand beschreibt den durch das Brandszenario hervorgerufenen möglichen Brandverlauf quantitativ in Form von zeitabhängigen Brandparametern und ist Grundlage eines risikogerechten Auslegungsverfahrens. Der Verlauf des Bemessungsbrandes ist von den wesentlichen Brandparametern abhängig. Bzgl. der Ventilationsverhältnisse ist zu untersuchen, ob eine niedrige Ventilation (ventilationsgesteuerter Brand) oder eine große Ventilation (brandlastgesteuerter Brand) maßgeblich sind [6.12].

Das Bauwerk ist so auszulegen, dass bei Auftreten des Bemessungsbrandes die in der Bauordnung verankerten Schutzziele erreicht werden können. Die Festlegung des Bemessungsbrandes in Form einer Wärmefreisetzungsrate wird in Kapitel 4 beschrieben. Der Bemessungsbrand lässt sich auf diese Weise physikalisch eindeutiger beschreiben als durch Vorgabe von Temperaturzeitkurven. Die Naturbrandnachweise sind durch einen hierfür qualifizierten Prüferingenieur bzw. Prüfsachverständigen nach Landesrecht zu prüfen.

In der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) werden Randbedingungen und Einschränkungen für die Anwendung von Naturbrandverfahren formuliert,

die eine Genehmigungsfähigkeit derartiger Nachweisen im Rahmen von zu beantragender bauordnungsrechtlicher Abweichungen gewährleisten.

Vereinfachte Naturbrandmodelle

Vereinfachte Naturbrandmodelle basieren auf ausgewählten physikalischen Größen, die nur in definierten Grenzen anwendbar sind.

Für Vollbrände wird eine gleichmäßige zeitabhängige Temperaturverteilung angenommen. Die Gastemperaturen sollten auf der Grundlage physikalischer Parameter berechnet werden, die mindestens die Brandlastdichte und die Ventilationsbedingungen berücksichtigen.

In Eurocode 1 Teil 1-2 Anhang A werden als vereinfachtes Naturbrandmodell für Vollbrände parametrische Temperaturzeitkurven angegeben, mit denen der Brandverlauf für kleine und mittlere Räumen vereinfacht berechnet werden kann. Hinsichtlich der Beschreibung eines realistischen Brandverlaufs weisen diese Parameterkurven Defizite auf und werden in der Literatur kritisch diskutiert [6.11]. Aus diesem Grunde ist die Anwendung der parametrischen Temperaturzeitkurven in Eurocode 1 Teil 1-2 Anhang A für Deutschland im Nationalen Anhang zu Eurocode 1 Teil 1-2 für die Anwendung nicht frei gegeben. Ein Großteil der europäischen Länder hat diesen Anhang ebenfalls ausgeschlossen. Alternativ wird im Nationalen Anhang das vereinfachte Naturbrandmodell [6.14], [6.15] angegeben, welches auch im Kapitel 4.3.3.4 dieses Leitfadens dargestellt wird.

Wenn es unwahrscheinlich ist, dass ein Feuerüberschlag (Flashover) stattfindet und der Brand lokal begrenzt bleibt, können die thermischen Einwirkungen aus einem lokalen Brandereignis berechnet werden. Für lokale Brände wird eine ungleichmäßige zeitabhängige Temperaturverteilung angenommen.

Das in Eurocode 1 Teil 1-2 Anhang C angegebene Modell für lokale Brände basiert auf dem Plumemodell von Heskestad (s. Kapitel 5) und ist im Nationalen Anhang zu Eurocode 1 Teil 1-2 für Deutschland zur Anwendung zugelassen [6.11].

Allgemeine Naturbrandmodelle

In allgemeinen Naturbrandmodellen sollten Gaseigenschaften, Massen- und Energieaustausch berücksichtigt werden. Die in Eurocode 1 Teil 1-2 als allgemeine Naturbrandmodelle bezeichneten Einzonen-, Mehrzonen- und CFD-Modelle werden in Kapitel 5 des vorliegenden Leitfadens ausführlich beschrieben.

Um die Temperaturverteilung längs eines Bauteils genauer zu bestimmen darf nach Eurocode 1 Teil 1-2 Abschnitt 3.3.2 im Falle eines lokalen Brandes eine Kombination der Ergebnisse mit dem Zweizonenmodell und der Näherung für lokale Brände verwendet werden. Das Temperaturfeld in einem Bauteil darf dadurch bestimmt werden, dass der größte Einfluss an jedem Ort aus den beiden Brandmodellen berücksichtigt wird.

Adiabatic Surface Temperature

Bei der Berechnung der Erwärmung von Bauteilen müssen sowohl die konvektiven als auch die radiativen Anteile des einwirkenden Nettowärmestroms berücksichtigt werden. Gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 berechnet sich der einwirkende Nettowärmestrom nach Gl. (6.1) bis (6.3).

Bei der Berechnung der Temperaturentwicklung in Brandräumen mit Hilfe von Wärmebilanz- oder CFD-Modellen werden Gastemperaturen berechnet. Die Gastemperatur in der Umgebung des Bauteils ist maßgeblich für die Berechnung des konvektiven Nettowärmestroms auf das beanspruchte Bauteil. Bei der Berechnung des radiativen Nettowärmestroms ist neben dem Anteil aus der Strahlung der Heißgasschicht auch die Strahlung der Flamme bzw. des Plumes zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für Bauteile in der Nähe von Brandherden. Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass speziell in hohen Räumen, in denen sich große Heißgasschichten ausbilden, die Strahlung der Flamme bzw. des Plumes für die Einwirkung von in der Heißgasschicht liegenden Bauteilen vernachlässigt werden können. In der Kaltgasschicht dominiert der radiative Nettowärmestrom.

In [6.16] und [6.17] wird ein Ansatz beschrieben, mit dem die thermische Einwirkung auf die Bauteile unter Berücksichtigung der radiativen Anteile durch die sogenannte „adiabatic surface temperature“ (AST) vereinfacht berechnet werden kann. Die AST ist eine ideale Oberflächentemperatur, die unter der Annahme ermittelt werden kann, dass der Wärmetransfer in eine Oberfläche der Wärmeabgabe von dieser gleich ist. Sie beinhaltet damit sowohl die konvektiven als auch radiativen Anteile des auf die Bauteile einwirkenden Nettowärmestroms. In der Wärmetransferberechnung kann diese ideale Größe AST die Oberflächentemperatur ersetzen und bei der thermischen Analyse zur Ermittlung der Bauteiltemperatur verwendet werden. Die AST kann somit die Schnittstelle zwischen Naturbrandmodell und Modell für die thermische Analyse bzw. zwischen Brandversuchskurve und Modell für die thermische Analyse bilden.

Die Auswirkung der Wärmestrahlung auf die AST wird anhand einer Vergleichsrechnung am Beispiel eines Brandraums mit Stahlstützen gezeigt (Bild 6.2). Die Temperaturen im Brandraum wurden mit dem CFD-Modell FDS berechnet. Im Modell wurden Ventilationsöffnungen so angeordnet, dass sich der untere Teil der Stützen in der Kaltgasschicht befindet.

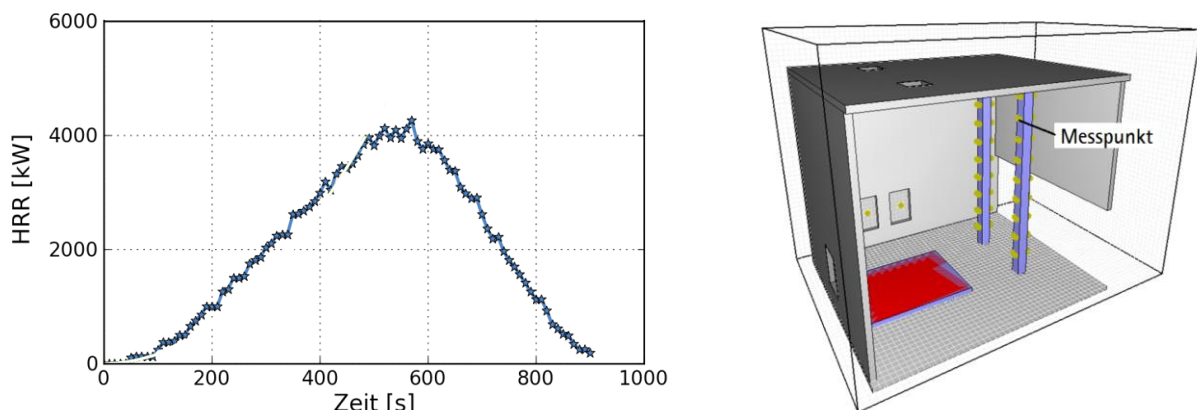


Bild 6.2 Modellraum für Berechnung der AST und angesetzte Wärmefreisetzungsrate für die Vergleichsrechnung

In Bild 6.3 werden die berechneten Gastemperaturen und AST dargestellt. Der Unterschied zwischen Gastemperatur und AST ist deutlich, besonders im unteren Bereich der Stütze (Messpunkte auf der Höhe von 1 und 3 m) und beträgt bis zu 200 °C. Die vorhandene Ventilationsöffnung vermeidet eine starke Erwärmung der Stütze unter der Einwirkung von den heißen Brandgasen. Dieser Bereich wurde vorwiegend durch Einwirkung der Strahlung erwärmt. Im Bereich der Heißgasschicht (8 m) bestehen keine relevanten Abweichungen

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

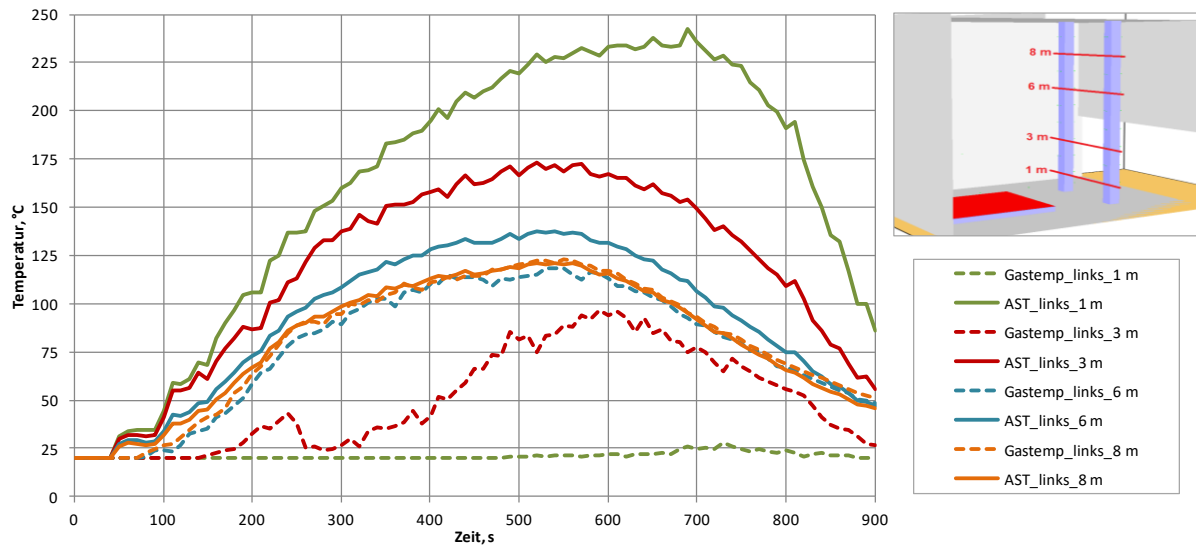


Bild 6.3 Vergleich der Gas- und AST-Temperatur auf der „bestrahlten“ Seite der Stütze

6.3.3 Mechanische Einwirkungen

Im Eurocode 1 Teil 1-2 wird zwischen direkten und indirekten Einwirkungen unterschieden. Als direkte Einwirkungen werden die bei der kalten Bemessung berücksichtigten Belastungen (Eigengewicht, Wind, Schnee, usw.) bezeichnet. Indirekte Einwirkungen infolge Brandbeanspruchung sind Kräfte und Momente, die durch thermische Ausdehnungen, Verformungen und Verkrümmungen hervorgerufen werden. Sie brauchen bei der brandschutztechnischen Bemessung von Einzelbauteilen und von Teil- und Gesamttragwerken nicht berücksichtigt zu werden, sofern sie das Tragverhalten nur geringfügig beeinflussen und / oder durch entsprechende Ausbildung der Auflager aufgenommen werden. Dies ist im Einzelfall zu prüfen. Als indirekte Einwirkungen kommen Zwangskräfte und -momente in Stützen, rahmenartigen Tragwerken, durchlaufenden Balken / Trägern und Auswirkungen thermischer Ausdehnung auf Bauteile, die nicht vom Brand beansprucht werden in Betracht. Diese können sich auch günstig auf die Tragfähigkeit im Brandfall auswirken (Reduzierung der Feldmomente durch Anstieg der Stützmomente).

Der Brandfall wird als ein „außergewöhnliches Ereignis“ angesehen, das nicht mit anderen, davon unabhängigen außergewöhnlichen Ereignissen überlagert zu werden braucht. Bei der Ermittlung der Beanspruchungen aus den Einwirkungen, d. h. den Lasten oder Zwangsbeanspruchungen, werden die Bemessungswerte allgemein aus den charakteristischen Werten durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_F und ggf. Kombinationsbeiwerten bei veränderlichen Einwirkungen bestimmt. Im Brandfall werden nur die ständigen Einwirkungen mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{GA} multipliziert, während die veränderlichen Einwirkungen wegen der Seltenheit des Brandereignisses mit Kombinationsbeiwerten $< 1,0$ abgemindert werden.

Bei Kombinationen von ständigen und veränderlichen Einwirkungen dürfen die veränderlichen Einwirkungen mit Kombinationsbeiwerten nach Tabelle 6.2 reduziert werden. Damit werden „häufige“ bzw. „quasi-ständige“ Bemessungswerte der Einwirkungen definiert, deren Auftreten gleichzeitig mit dem seltenen Brandereignis real zu erwarten ist. Im Nationalen Anhang zu EC 1-1-2 wird festgelegt, dass in der Regel die quasi-ständige Größe $\psi_{2,i} Q_{k,i}$ verwendet werden

darf. Dies gilt nicht für Bauteile, deren Leiteinwirkung der Wind ist. In diesem Fall ist für die Einwirkung aus Wind die häufige Größe $\psi_{1,1} Q_{k,1}$ zu verwenden.

Mit der Kombinationsregel für außergewöhnliche Ereignisse wird die maßgebliche Beanspruchung $E_{fi,d,t}$ während der Brandeinwirkung nach Gl. (6.7) festgelegt:

$$E_{fi,d,t} = \sum \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (6.7)$$

mit

- G_k charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen,
- $Q_{k,1}$ charakteristischer Wert einer (des Leitwertes der) veränderlichen Einwirkung,
- $Q_{k,i}$ charakteristischer Wert weiterer veränderlicher Einwirkungen,
- $A_d(t)$ Bemessungswert der indirekten Einwirkungen,
- γ_{GA} Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen, (in der Regel 1,0, für Abweichungen siehe Kapitel 10 des Leitfadens),

$\psi_{1,1}, \psi_{2,i}$ Kombinationsbeiwerte nach DIN EN 1990 [6.18] (s. Tabelle 6.3).

Als Vereinfachung dürfen die Einwirkungen während der Brandbeanspruchung direkt aus den Einwirkungen bei Normaltemperatur nach Gl. (6.8) ermittelt werden:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (6.8)$$

mit

E_d Bemessungswert der Einwirkungen nach EC 1-1-1, mit Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte für ständige und veränderliche Einwirkungen γ_G, γ_Q

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi} \quad (6.9)$$

Reduktionsfaktor, abhängig vom Verhältnis des Hauptwertes der veränderlichen Einwirkungen zur ständigen Einwirkung $\xi = Q_{k,1}/G_k$.

Bild 6.4 zeigt die Auswertung von Gl. (6.3) mit Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$ für verschiedene Kombinationsbeiwerte ψ_{fi} .

Tabelle 6.2 Kombinationsbeiwerte im Hochbau (Auszug aus [6.19], Tabelle A.1.1)

Einwirkungen	Kombinationsbeiwert		
	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten im Hochbau			
Wohngebäude und Bürogebäude	0,7	0,5	0,3
Versammlungsbereiche und Verkaufsflächen	0,7	0,7	0,6
Lagerflächen	1,0	0,9	0,8
Windlasten	0,6	0,2	0
Schneelasten in einer Höhe niedriger als 1000 m ü. NN	0,5	0,2	0
Schneelasten in einer Höhe über 1000 m ü. NN	0,7	0,5	0,2

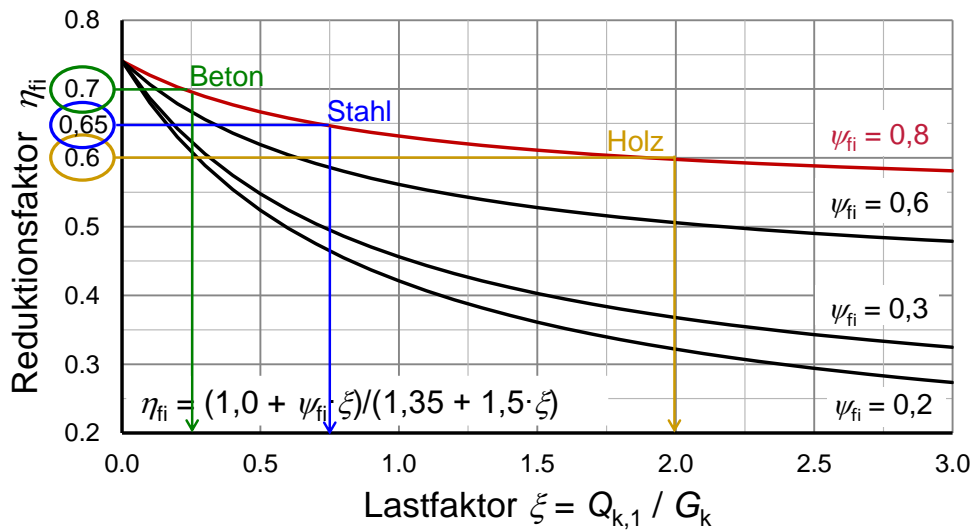


Bild 6.4 Reduktionsfaktor η_{fi} in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen ständiger und dominierender veränderlicher Einwirkung ($\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$)

Ohne genauen Nachweis dürfen für den Reduktionsfaktor η_{fi} die in Tabelle 6.3 aufgeführten Werte genommen werden.

Tabelle 6.3 Reduktionsfaktor η_{fi}

Brandschutzteil und NA	Reduktionsfaktor η_{fi}
Eurocode 2	0,7
Eurocode 3	0,65 (Kategorie E: 0,7)
Eurocode 4	0,65 (Kategorie E: 0,7)
Eurocode 5	0,6 (Kategorie E: 0,7)
Eurocode 6	0,7

6.4 Materialeigenschaften

6.4.1 Thermische Materialeigenschaften

6.4.1.1 Allgemeines

Grundlage für die Berechnung der Temperaturverteilung in Bauteilen ist die Differentialgleichung von Fourier (Gl. (6.10)) zur Beschreibung der instationären Wärmeleitung in Festkörpern. Dabei wird vorausgesetzt, dass keine Wärmequellen oder -senken im Körperinneren vorhanden sind.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \quad (6.10)$$

mit

T Temperatur [K],

t Zeit [s],

$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ Temperaturleitzahl [m^2/s],

λ Wärmeleitfähigkeit [$W/(m \cdot K)$],

ρ Rohdichte [kg/m^3],

c_p spezifische Wärme [$J/(kg \cdot K)$],

x, y, z Raumkoordinaten [m].

Eine analytische Lösung für Gl. (6.10) lässt sich nur für den Sonderfall eines homogenen und isotropen Körpers mit eindimensionalem Wärmestrom und temperaturunabhängigen thermischen Materialeigenschaften finden. Zur Berechnung der Temperaturverteilung innerhalb brandbeanspruchter Bauteile aus Beton und Stahl müssen die temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit λ , spezifische Wärme c_p und Rohdichte ρ (Bild 6.5) berücksichtigt werden. Damit ist die Zielgröße der Berechnung, die Temperatur, von

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

temperaturabhängigen Eingangsparametern abhängig. Zur Lösung werden numerische Methoden wie z. B. die Methode der Finiten Elemente (FEM) oder die Methode der Finiten Differenzen mit Integrationsverfahren über die Zeitschritte eingesetzt. Für baupraktische Fälle können dabei in der Regel folgende Vereinfachungen getroffen werden:

- Die Temperatursausbreitung in Bauteillängsrichtung wird vernachlässigt. In stabförmigen Bauteilen wird die Temperatursausbreitung nur in der Querschnittsfläche (zweidimensional) und in flächigen Bauteilen nur über die Querschnittsdicke (eindimensional) berechnet.
- Wasserdampfbewegungen werden nicht erfasst.
- Beim Beton wird der Energieverbrauch für das Verdampfen von Wasser und sonstige energieverzehrende Vorgänge durch die geeignete Wahl des Rechenwerts für die spezifische Wärmekapazität des Betons im Temperaturbereich 100 - 200 °C berücksichtigt.
- Beton wird bezüglich seiner thermischen Materialeigenschaften als homogener Baustoff angesehen. Das heterogene Gefüge, Kapillarporen und Risse werden pauschal in den thermischen Materialgesetzen erfasst.

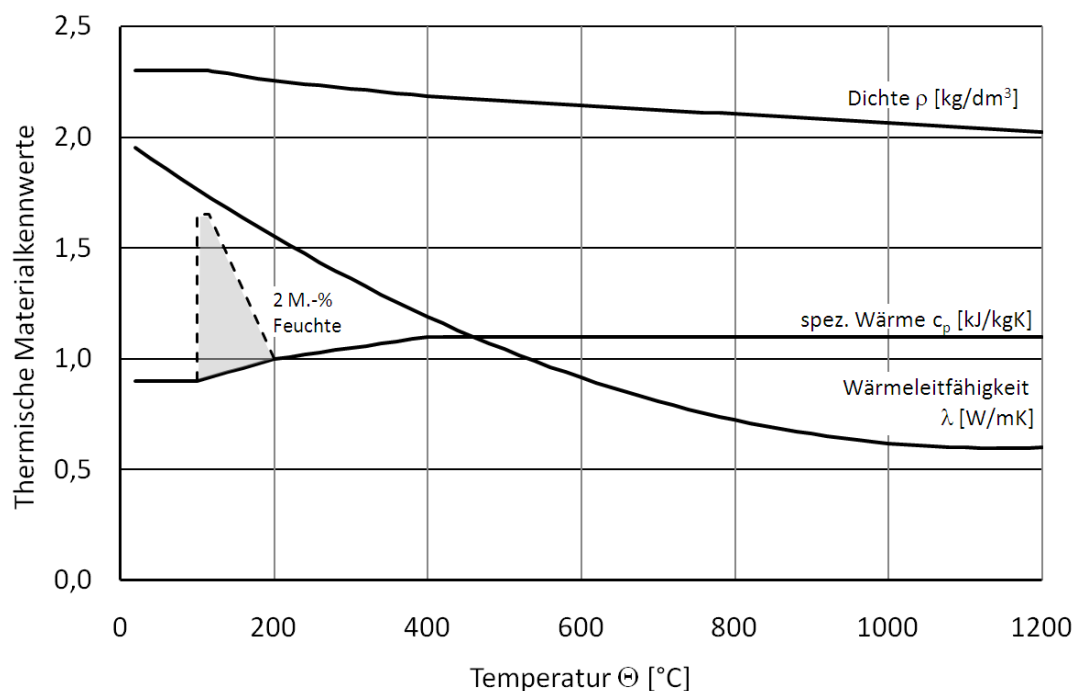


Bild 6.5 Rechenwerte der temperaturabhängigen thermischen Materialkennwerte von Beton nach [EC2-1-2/NA:2010]

Für die Berechnung der Temperaturverteilung in hochbautypischen Bauteilen können die folgenden Hinweise nützlich sein. Die Hinweise sollen Hilfestellung für die thermische Analyse geben, im konkreten Einzelfall können Abweichungen von den aufgeführten Zahlenwerten sinnvoll sein.

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

- Bei der Diskretisierung der Bauteilquerschnitte sollte die Größe der finiten Elemente der Temperaturverteilung angepasst werden. Im Bereich großer Temperaturgradienten – z. B. an den beflamnten Querschnittsrändern – sollte eine feinere Diskretisierung als im Querschnittsinneren vorgenommen werden.
- Die Elementgrößen sind in Abhängigkeit der Querschnittsgröße bzw. –dicke zu wählen. Bei Stahlbetonbauteilen sollte die Kantenlänge der Elemente 2 – 3 cm nicht überschreiten. Bei Stahlbauteilen sind ggf. auch wesentlich kleinere Elemente erforderlich, über die Querschnittsdicke sollten wenigstens drei Elemente abgebildet werden.
- Die Länge der Elementseiten sollten im Verhältnis kleiner oder gleich 1:4 gewählt werden.
- Symmetriebedingungen hinsichtlich der Beflammung sollten ausgenutzt werden, um die Anzahl der Elemente zu begrenzen.
- Die Diskretisierung der thermischen und mechanischen Analyse sollte auf einander abgestimmt sein.
- Das Zeitintervall zur Berechnung der Temperaturverteilung sollte bei Stahlbeton-, Verbund- und bekleideten Stahlquerschnitten nicht größer 30 Sekunden sein und bei unbekleideten Stahlquerschnitten nicht mehr als 5 Sekunden betragen.
- Für Stahlbetonquerschnitte mit praxisüblichem Bewehrungsgehalt und Bewehrungsstäbe mit einem max. Durchmesser von 30 mm darf die Bewehrung bei der thermischen Analyse vernachlässigt werden. Die Temperatur in der Achse des Bewehrungsstabes entspricht in etwa der Temperatur im ungestörten Beton [6.20]. Bei einem Stabdurchmesser von mehr als 30 mm treten signifikante Abweichungen auf, so dass eine Vernachlässigung der Bewehrung bei der thermischen Analyse nicht empfohlen wird [6.21].

6.4.1.2 Thermische Leitfähigkeit von Beton

In Eurocode 2 Teil 1-2 (Fassung 2010) [6.2] sind für die Thermische Leitfähigkeit von Beton eine obere und eine untere Grenzwertfunktion angegeben. Die Messung der thermischen Leitfähigkeit ist aufgrund der Feuchtetransportprozesse mit einer großen Messunsicherheit verbunden, experimentell bestimmte Werte liegen in einer großen Bandbreite. Allgemein ist festzustellen, dass die thermische Leitfähigkeit von Beton mit steigender Temperatur aufgrund der Verdunstung des gebundenen Wassers sinkt [6.21]. Für Deutschland ist im Nationalen Anhang zu Eurocode 2 Teil 1-2 die obere Grenzwertfunktion für die thermische Leitfähigkeit festgelegt, einige europäische Länder haben die untere Grenzwertfunktion festgelegt. Sowohl die obere, als auch die untere Grenzwertfunktion spiegeln keine gemessenen thermischen Leitfähigkeiten wider, sondern wurden anhand von Nachrechnungen durchgeführter Versuche bestimmt. Sie sind daher als effektive thermische Leitfähigkeiten zu betrachten, die die Modellunsicherheiten (u. a. Feuchtetransport) mitabdecken. Im Bestreben einer einheitlichen Regelung und um eine bessere Übereinstimmung mit neueren Versuchsergebnissen zu erreichen, wurde daher ein neuer Ansatz („mixed curve“) für eine Funktion der thermischen Leitfähigkeit entwickelt, der die beiden Grenzwertfunktionen miteinander kombiniert [6.21]. Wie Bild 6.6

zeigt, verläuft die neue Ansatzfunktion im Temperaturbereich bis 140 °C deckungsgleich mit der oberen Grenzwertfunktion nach Eurocode 2 Teil 1-2 (Fassung 2010) [6.2]. Zwischen 140°C und 160°C fällt die thermische Leitfähigkeit linear ab und verläuft im Temperaturbereich zwischen 160 °C und 1200 °C deckungsgleich mit der unteren Grenzwertfunktion.

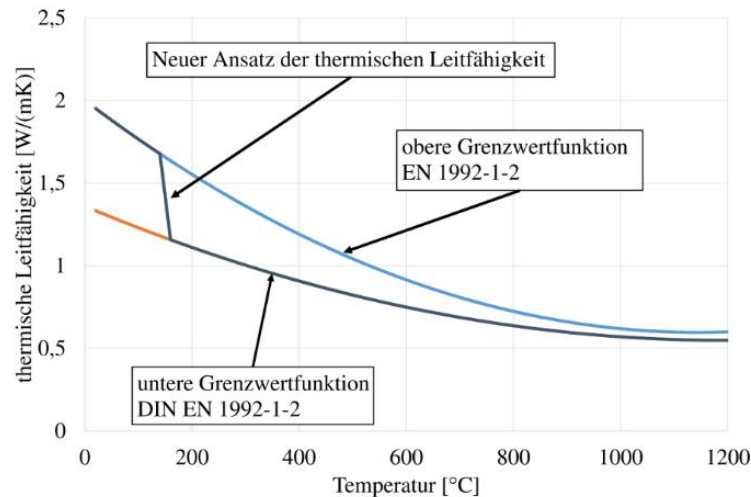


Bild 6.6: Neuer Ansatz „mixed-curve“ der thermischen Leitfähigkeit im Vergleich zu den Grenzwert-funktionen nach DIN EN 1992-1-2

Der neue Ansatz der „mixed curve“ wurde anhand von Nachrechnungen an über 20 Brandversuchen an Decken, Wänden und Stützen von Prüfanstalten in Deutschland, Frankreich und Schweden kalibriert [6.22]. Im Ergebnis zeigte sich, dass mit dem Ansatz der „mixed curve“ die Temperaturen in Höhe der Bewehrung mit einer besseren Genauigkeit und überwiegend auf der sicheren Seite liegend bestimmt werden können [6.21].

6.4.2 Mechanische Materialeigenschaften

6.4.2.1 Allgemeines

Für Bauteile und Tragwerke wird der brandschutztechnische Nachweis in der Regel durch eine

- Querschnittsanalyse und / oder eine
- Analyse des Systemverhaltens

durchgeführt. Dabei wird von der nach Kapitel 6.3 berechneten Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt ausgegangen, zusätzlich werden die temperaturabhängigen Baustoffeigenschaften (Festigkeit, Elastizitätsmodul, thermische Dehnung) berücksichtigt.

In der Querschnittsanalyse wird die plastische Tragfähigkeit des Bauteilquerschnitts berechnet und mit den im Brandfall maßgebenden Einwirkungen verglichen, das Verformungsverhalten der Bauteile oder Tragwerke wird nicht berechnet. Ein typischer Anwendungsfall sind statisch bestimmt gelagerte Balken oder Träger, für die im Brandfall die temperaturabhängige Biegetragfähigkeit $M_{R,fi,d}$ und die maximale Momentenbeanspruchung $M_{E,fi,d}$ gegenübergestellt werden. Im brandschutztechnischen Nachweis wird $M_{E,fi,d} \leq M_{R,fi,d}$ nachgewiesen (Bild 6.7).

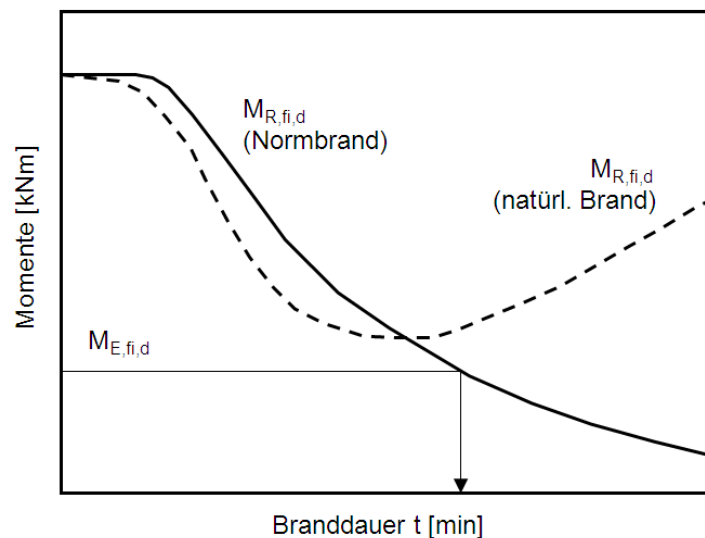


Bild 6.7 Prinzipieller Verlauf der Biegetragfähigkeit $M_{R,fi,d}$ und der Momentenbeanspruchung $M_{E,fi,d}$ bei einem statisch bestimmt gelagerten Balken

Bei der Analyse des Systemverhaltens eines Bauteils oder Tragwerks wird das Trag- und Verformungsverhalten unter Brandeinwirkung berechnet. Typische Anwendungsfälle sind die brandschutztechnische Bemessung schlanker Druckglieder und statisch unbestimmter Systeme, z. B. Rahmentragwerke und Durchlaufträger. In diesen Fällen hängt die Beanspruchung von den Verformungen des Bauteils oder Tragwerks ab, beispielsweise müssen bei schlanken Stützen die Einwirkungen nach Theorie 2. Ordnung und bei statisch unbestimmten Systemen die thermisch bedingten Zwangsschnittgrößen berücksichtigt werden.

6.4.2.2 Spannungs-Dehnungsbeziehungen und thermische Dehnungen

Grundlage der brandschutztechnischen Bauteil- und Tragwerksanalyse sind die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien und thermischen Dehnungen der Baustoffe. In den Brandschutzteilen der Eurocodes 2, 3 und 4 sind alle wesentlichen Informationen zur temperaturabhängigen Veränderung der mechanischen Baustoffwerte enthalten.

Exemplarisch sind in Bild 6.8 temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Beton mit überwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung, in Bild 6.9 für warmgewalzten Betonstahl (B 500) und in Bild 6.10 für Baustahl dargestellt. Bild 6.11 zeigt die thermischen Dehnungen für Beton, Betonstahl, Spannstahl und Baustahl.

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

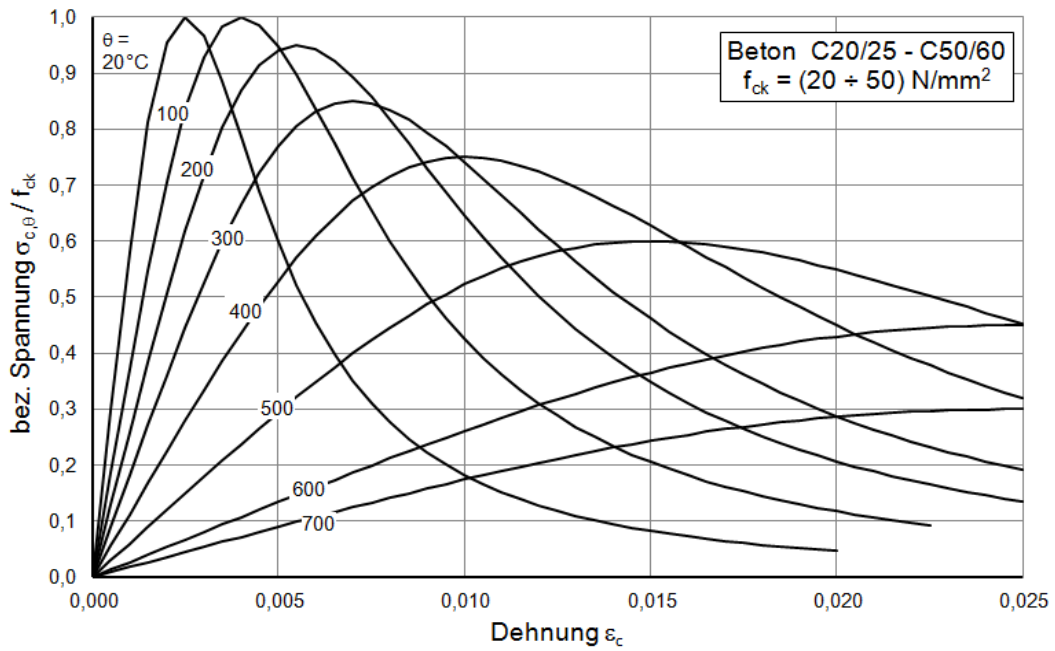


Bild 6.8 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Beton mit überwiegend quarzhaltiger Gesteinskörnung

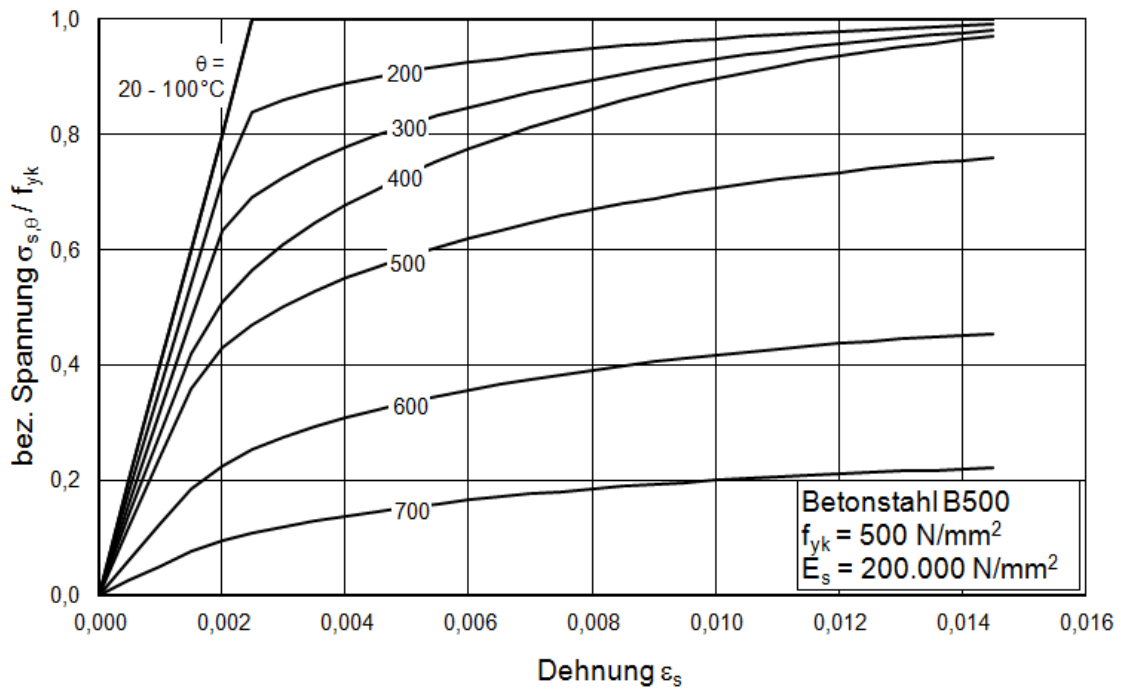


Bild 6.9 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von warmgewalztem Betonstahl (B 500)

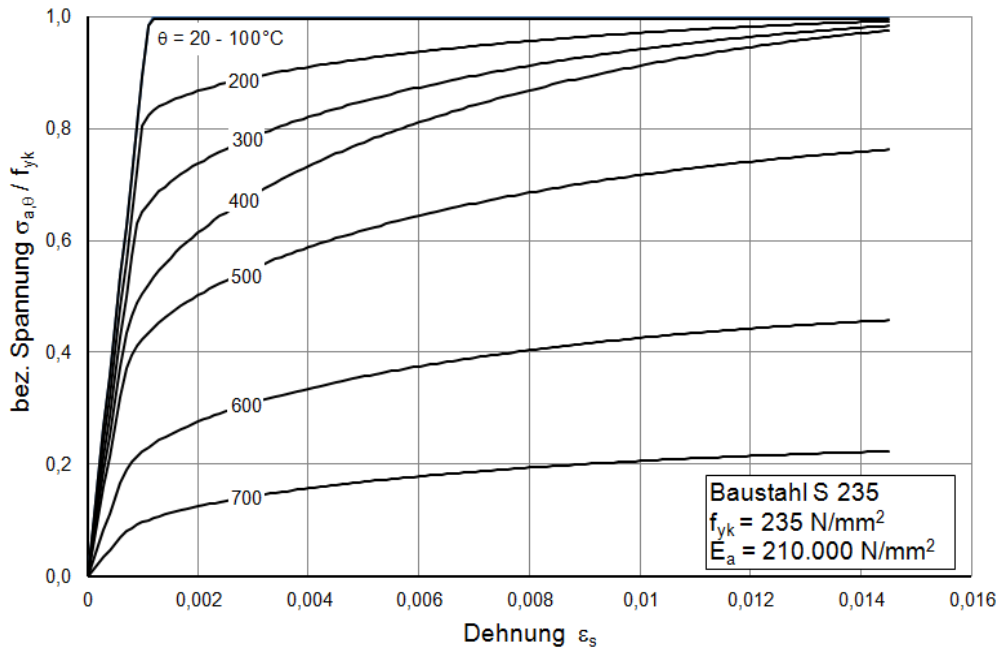


Bild 6.10 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Baustahl

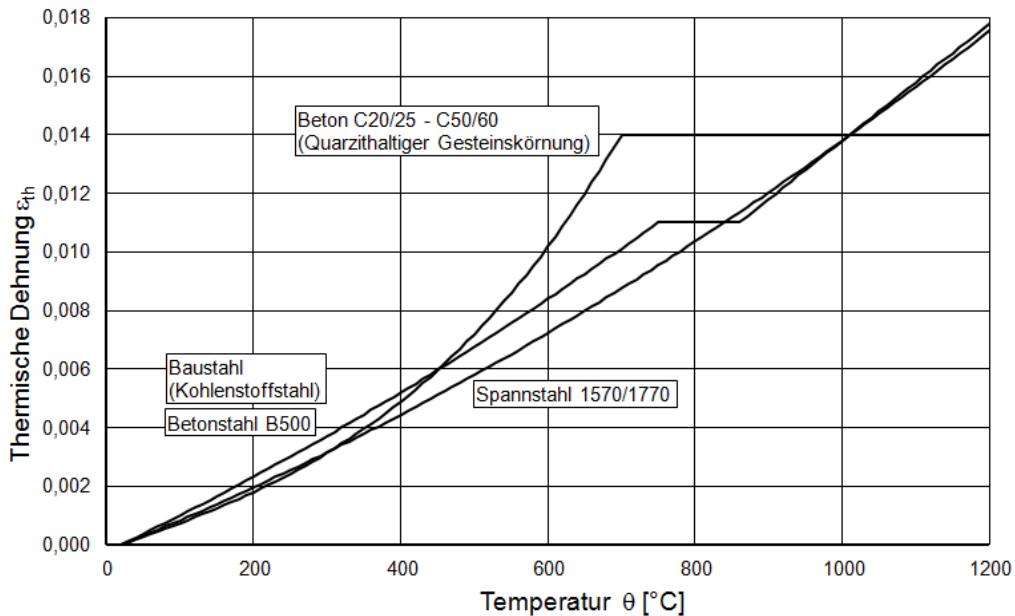


Bild 6.11 Thermische Dehnung von Beton, Betonstahl, Spannstahl und Baustahl

Zur numerischen Beschreibung der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien und der thermischen Dehnungen werden in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2, 3 und 4 Gleichungen angegeben. Die Eingangsparameter zur Berechnung der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien sind als charakteristische Werte definiert, ihnen liegt die 5 %-Fraktile der Grundgesamtheit zu Grunde. Beim Beton wird als Festigkeitswert die Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} und beim Betonstahl bzw. Baustahl die Streckgrenze f_{yk} bzw. f_{ay} eingegeben. Beim Spannstahl wird aufgrund des Fehlens einer ausgeprägten Streckgrenze der Wert $0,9 \cdot f_{pk}$ eingegeben. Zur Ermittlung der Bemessungswerte werden die charakteristischen Werte durch

die von den Streuungen der Baustoffkennwerte abhängigen Teilsicherheitsbeiwerte γ_M dividiert. Die Bemessungswerte der mechanischen Kennwerte ergeben sich nach Gl. (6.11):

$$X_{fi,d} = k_{\Theta} \cdot \frac{X_{k,\Theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.11)$$

mit

k_{Θ} temperaturabhängiger Reduktionsfaktor für Festigkeit und E-Modul des Baustoffs,

$\gamma_{M,fi}$ Teilsicherheitsbeiwert für den entsprechenden Baustoff im Brandfall.

Generell werden die Teilsicherheitsbeiwerte zur Ermittlung der Bemessungswerte der Baustoffe unter Brandbeanspruchung aus den Eurocodes 2 bis 4 Teile 1-2 in Verbindung mit dem Nationalen Anhängen zu $\gamma_{M,fi} = 1,0$ gesetzt.

In EC 5-1-2 werden die Bemessungswerte der Festigkeit und des E-Moduls abweichend von Gl. (6.11) als 20 %-Fraktile der Festigkeits- bzw. Steifigkeitseigenschaft bei Normaltemperatur, multipliziert mit dem Modifikationsbeiwert im Brandfall $k_{mod,fi}$ und dividiert durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi} = 1,0$ festgelegt. Im Anhang B des EC 5-1-2 sind die Eingangsparameter für die thermischen und mechanischen Materialkennwerte von Holz zusammengestellt.

Abweichend von EC 2-1-1 ist in EC 2-1-2 kein Bemessungsverfahren für die Schubtragfähigkeit angegeben. Das liegt daran, dass ein solches Verfahren zurzeit für den Brandfall nicht existiert. Versuche haben gezeigt, dass die Schubtragfähigkeit für Balken, Rippendecken und Platten erst ab Feuerwiderstandsdauern von 90 Minuten maßgebend wird [6.23]. Bisher reichen die Bemessungsvorschriften aus, um Stahlbetonbalken für die Feuerwiderstandsklassen bis R 90 zu dimensionieren. Um höhere Feuerwiderstandsklassen zu erreichen, müssen dagegen in vielen Fällen besondere Maßnahmen getroffen werden. Dies betrifft zum Beispiel Durchlaufträger, die bei einer Feuerwiderstandsdauer von 180 Minuten wesentlich größere Querschnitte aufweisen müssen als Einfeldträger. Für Flachdecken (punktgestützte Platten) kann die Schubtragfähigkeit maßgeblich werden, sie können daher nicht mit einem Rechenverfahren nachgewiesen werden.

6.4.2.3 Versagenskriterien

Zur Ermittlung des Versagenszeitpunktes eines Tragwerks ist nach DIN EN 1990 der Grenzzustand der Tragfähigkeit erreicht, wenn ein Versagen oder übermäßige Verformungen des Tragwerks oder seiner Teile eintreten. Dies betrifft lediglich das Tragfähigkeitskriterium, jedoch nicht den Raumabschluss oder die Wärmedämmeigenschaften.

Im Allgemeinen muss die Tragfähigkeit für die festgelegte Feuerwiderstandsdauer t nachgewiesen werden durch:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (6.12)$$

mit

$E_{d,fi}$ Bemessungswert der Schnittgrößen im Brandfall,

$R_{d,t,fi}$ zugehöriger Bemessungswert des Widerstands im Brandfall.

Nach Kapitel 6.5.3 kann bei den allgemeinen Bemessungsverfahren eine Querschnittsanalyse oder eine Systemanalyse durchgeführt werden. In der Querschnittsanalyse wird die plastische Tragfähigkeit des Bauteilquerschnitts berechnet und mit den im Brandfall maßgebenden Einwirkungen verglichen. Bei der Systemanalyse wird das Trag- und Verformungsverhalten des Teil- bzw. des Gesamttragwerkes unter Brandeinwirkung berechnet. Nach EC 2-1-2 muss bei Gesamttragwerks- oder Teiltragwerksberechnungen für den Brandfall die bei Brandbeanspruchung maßgebende Versagensart erfasst werden. Zusätzlich müssen die im Grenzzustand der Tragfähigkeit entstehenden Verformungen begrenzt werden, um das Zusammenwirken aller Teile des Tragwerks sicherzustellen. Dabei entsteht die Frage nach geeigneten Versagenskriterien.

Im Folgenden werden mögliche Versagenskriterien bei den allgemeinen Bemessungsverfahren vorgestellt:

Beurteilung der Tragfähigkeit in Anlehnung an DIN EN 13501-2 bzw. DIN EN 1363-1

Die o.g. Normen [6.19] und [6.24] beziehen sich auf die Versagenskriterien von biegebeanspruchten Bauteilen in Prüfungen. Dabei ist zu beachten, dass in den Prüfungen lediglich Einzelbauteile betrachtet werden. Die Anwendung der hier vorgestellten Versagenskriterien für Gesamttragwerke muss überprüft werden. Sind die Randbedingungen mit einem Einfeldträger vergleichbar, so können die Kriterien direkt angewandt werden. Unterscheidet sich das statische System von einem Einfeldträger, so muss die Spannweite entsprechend der Verformungsfigur auf einen Einfeldträger angepasst werden.

- a) Durchbiegung: $D = L^2/(400 d)$ [mm],
- b) Durchbiegungsrate: $dD/dt = L^2/(9.000 d)$ [mm/min].

Dabei ist

- L die lichte Spannweite in mm,
- d der Abstand in mm des äußersten Randes der Druckzone bis zum äußersten Rand der Zugzone des tragenden Querschnitts jeweils bei Kaltbemessung.

Das Kriterium der Durchbiegungsrate gilt erst, nachdem eine Durchbiegung von $L/30$ überschritten wird.

Durch die im Brandfall auftretenden Verformungen können angrenzende Bauteile beschädigt und unter Umständen sogar in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. Da diese Kriterien in den Berechnungen zum Systemverhalten nicht angesetzt werden können, sind entweder geeignete Verformungsgrenzen zum Einhalten dieser Anforderungen anzusetzen oder Maßnahmen zu ergreifen, die die auftretenden Verformungen kompensieren.

Zusätzlich sind auch die Auflagerbedingungen der angrenzenden Bauteile zu beachten, z. B. Glasbauteile oder Wände. Weiterhin muss beachtet werden, dass das Bauteil während der Durchbiegung nicht vom Auflager rutschen kann.

Berücksichtigung des Temperaturkriteriums (I-Kriterium)

Zum Nachweis des Temperaturkriteriums von Bauteilen gibt EC 2-1-2 folgende Hinweise:

In der Erwärmungsphase bis zum Erreichen der maximalen Heißgastemperatur im Brandabschnitt darf die mittlere Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Bauteiloberfläche nicht größer werden als 140 K und die maximale Temperaturerhöhung darf 180 K nicht übersteigen. Während der Abkühlphase darf die mittlere Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Bauteiloberfläche nicht größer werden als 200 K und die maximale Temperaturerhöhung darf 240 K nicht übersteigen.

In ISO PDTR 15657 [6.25] wird als zusätzliches Kriterium für Trennwände von Rettungswege eine maximale Strahlungsrate auf der brandabgekehrten Seite von 3 kW/m² angegeben.

6.5 Bemessungsverfahren

6.5.1 Tabellarische Bemessungsverfahren

Die tabellarischen Bemessungsverfahren sind in EC 2-1-2, EC 4-1-2 und EC 6-1-2 enthalten, in EC 3-1-2 und EC 5-1-2 sind für Bauteile nur rechnerische Nachweisverfahren enthalten.

Tabellarische Bemessungsverfahren beschränken sich in der Regel darauf, die Querschnittsabmessungen oder Bekleidungsstärken eines Bauteils mit Werten zu vergleichen, die nach Brandversuchsergebnissen zum Erreichen der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer erforderlich sind.

Die Bemessungstabellen enthalten in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsklasse Mindestwerte für die Querschnittsabmessungen und – für Stahlbeton- und Spannbetonbauteile – die Mindestachsabstände der Bewehrung bzw. für die Verbundbauteile die im Brandfall erforderliche Zulagebewehrung. Für Stahlbetonstützen, belastete Stahlbetonwände und Verbundstützen und -trägern wird als zusätzlicher Parameter der Lastausnutzungsfaktor angegeben.

In den Tabellen darf zwischen den angegebenen Werten linear interpoliert werden. Weitere Rechenvorschriften ermöglichen für statisch bestimmt gelagerte Stahlbetonbalken und -decken die individuelle Ermittlung der kritischen Temperatur sowie für Stahlbetonstützen und belastete Stahlbetonwände die Bestimmung des aktuellen Lastausnutzungsfaktors.

Im normativen Teil des Eurocodes 2 Teil 1-2 werden für die Brandschutzbemessung von Stahlbetonstützen die Methoden A und B und im Anhang C die Tabellen C.1 bis C.9 angeboten. Im Nationalen Anhang des Eurocodes 2-1-2 wird nur die Anwendung von Methode A zugelassen. Methode A bietet die Möglichkeit der tabellarischen Ermittlung von Mindestquerschnittsabmessungen und Achsabständen von Stützen mit Rechteck- oder Kreisquerschnitt oder die rechnerische Ermittlung der vorhandenen Feuerwiderstandsdauer unter Berücksichtigung der wesentlichen Traglastparameter wie Größe der Lastausnutzung, des Achsabstandes, der Ersatzlänge im Brandfall, des Betonquerschnitts und der Bewehrungsmenge.

Für die Bemessung von Stützen wurden zusätzlich zur bekannten Methode A neue Bemessungstabellen entwickelt, mit denen auch Kragstützen bemessen werden können, die im third draft der Überarbeitung des EC 2-1-2 [6.26] in Anhang B enthalten sind. Weiterhin sind in dem third draft des EC 2-1-2 [6.26] die Tabellen für einseitig beanspruchte Stützen und Wände für unterschiedliche Lastausnutzungsgrade und Lagerungsbedingungen erweitert worden.

Die Bemessungstabellen in Anhang B des third draft von EC 2-1-2 [6.26] wurden auf Grundlage eines vereinfachten Bemessungsverfahrens entwickelt [6.27]. Dabei wird zunächst nach

der Zonen-Methode ein reduzierter Betonquerschnitt ermittelt und dann für den reduzierten Betonquerschnitt und der mittleren Bewehrungs- und Betontemperatur die Stützentragsfähigkeit mit Hilfe der M/N-Interaktionskurve ermittelt. Die Bemessungstabellen können für die Fälle gleicher effektiver Stützenlänge im Brandfall und bei Normaltemperatur ($l_{0,fi} = 1,0 l_0$) wie z. B. Kragstützen sowie für den Fall $l_{0,fi} = 0,7 l_0$ angewendet werden. Eine Anwendung für den Fall $l_{0,fi} = 0,5 l_0$ ist nicht möglich, hier sind Methode A oder vereinfachte bzw. erweiterte Bemessungsverfahren anzuwenden. Bei Anwendung der Bemessungstabellen nach [6.27] kann die zulässige effektive Stützenlänge bei Normaltemperaturbemessung $l_{0,max}$ in Abhängigkeit der Parameter Feuerwiderstandsdauer R, Querschnittsabmessung b, Lastausnutzungsgrad μ_{fi} , Ausmitte e_0 und Achsabstand a ermittelt werden. Dabei sind z. T. mehrfache Interpolationen erforderlich. Validierungsberechnungen mit dem erweiterten Bemessungsverfahren zeigen, dass die Bemessungstabellen nach [6.27] auf der sicheren Seite liegen (Bild 6.12).

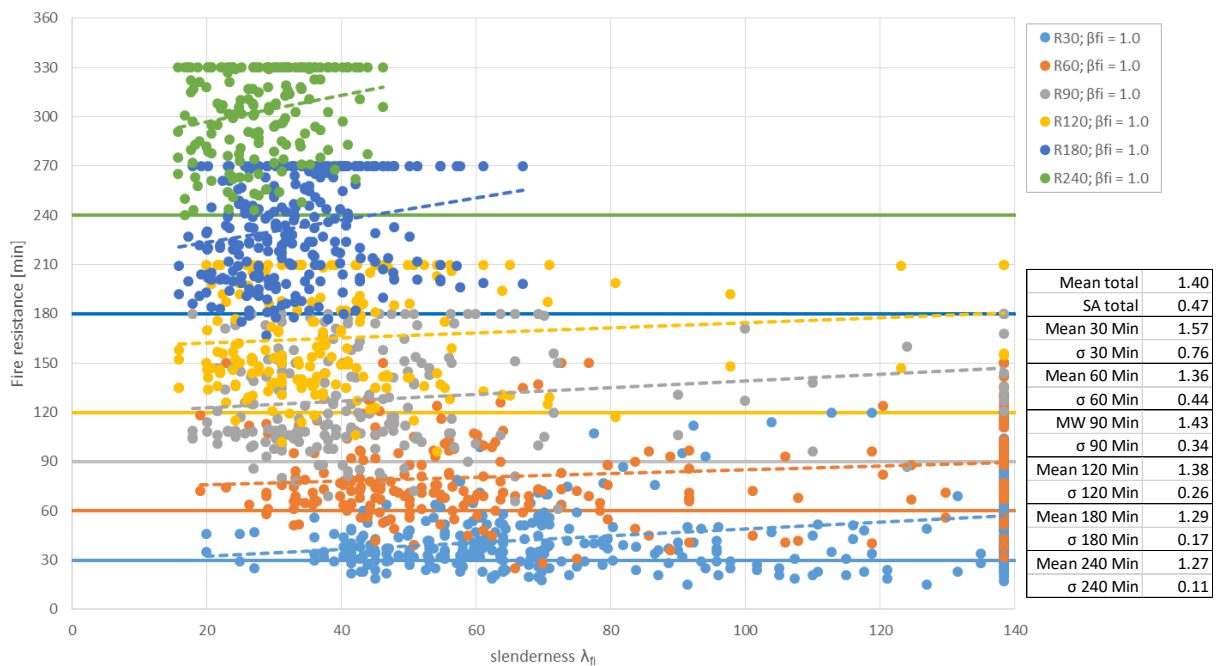


Bild 6.12 Vergleich der berechneten Feuerwiderstandsdauer der Bemessungstabellen [6.27] mit dem erweiterten Bemessungsverfahren für unterschiedliche Schlankheiten und gleicher Knicklänge im Kaltfall und im Brandfall ($l_0 = l_{0,fi} = l$)

In der Bemessungstabelle von Methode A sind für einseitig brandbeanspruchte Stützen in [6.2] nur Mindestabmessungen für einen Lastausnutzungsgrad von $\mu_{fi} = 0,7$ und für den Fall $l_{0,fi} = 0,5 l_0$ gegeben. Die Brandschutzbemessung von einseitig brandbeanspruchten Stützen mit Methode A führt daher für Lastausnutzungsgrade $\mu_{fi} < 0,7$ zu konservativen Ergebnissen. Weiterhin werden bisher keine tabellarischen Daten für die Fälle $l_{0,fi} \neq 0,5 l_0$ gegeben. Aus vorgeannten Gründen wurden für den third draft von Eurocode 2 Teil 1-2 [6.26] auf Grundlage von Berechnungen mit dem erweiterten Bemessungsverfahren neue Bemessungstabellen für einseitig brandbeanspruchte Stützen entwickelt, welche einen größeren Anwendungsbereich bezüglich des Lastausnutzungsgrads ($\mu_{fi} = 0,2; 0,5; 0,7$) sowie der effektiven Stützenlänge ($l_{0,fi} = 0,5 l_0; l_{0,fi} = 1,0 l_0$) berücksichtigen [6.28].

Die in EC 2-1-2 [6.2] enthaltene Bemessungstabelle für tragende Wände wurde aus DIN 4102-4:1994-03 übernommen. Die Bemessungstabelle enthält lediglich zwei Lastausnutzungsgrade. Die Umstellung vom globalen auf das semi-probabilistische Sicherheitskonzept wurde bei der Übernahme der Bemessungstabelle für tragende Wände in [6.2] nicht berücksichtigt. Aus vorgenannten Gründen wurden für den third draft von Eurocode 2 Teil 1-2 [6.26] auf Grundlage von Berechnungen mit dem erweiterten Bemessungsverfahren vier neue Bemessungstabellen für tragende Wände jeweils für die Lastausnutzungsgrade $\mu_{fi} = 0,2; 0,5; 0,7$ entwickelt: für raumabschließende (einseitig brandbeanspruchte) tragende Wände mit $l_0 \leq 3,0$ m; $\beta_{fi} = 1,0$ und $l_0 \leq 4,50$ m; $\beta_{fi} = 0,5$, sowie für zweiseitig brandbeanspruchte Wände mit $l_0 \leq 3,0$ m; $\beta_{fi} = 1,0$ und $l_0 \leq 4,50$ m; $\beta_{fi} = 0,5$ [6.29].

In Eurocode 4 Teil 1-2 sind Bemessungstabellen für kammerbetonierte Verbundträger sowie Verbundstützen (voll einbetonierte Stahlquerschnitte, kammerbetoniert, betongefüllte Hohlprofile) enthalten.

Die Bemessungstabellen in EC 6-1-2 enthalten im Wesentlichen keine Bemessungswerte. Für die brandschutztechnische Bemessung von Mauerwerksbauteilen sind daher die Bemessungstabellen im Nationalen Anhang [6.8] erforderlich. [6.8] enthält tabellierte Werte für

- nichttragende und raumabschließende Wände,
- tragende und raumabschließende Wände,
- tragende und nichtraumabschließende Wände,
- tragende Pfeiler und
- Brandwände.

Für den Nachweis tragender Wände und Pfeiler ist ein Lastausnutzungsfaktor zu bestimmen. Dieser kann für Kalksandsteinmauerwerk aus Vollsteinen nach den Tabellen [6.8] NA.B. 2.2, NA.B. 2.3 und NA.B.2.4 direkt mit $\alpha_{fi} = N_{E,d,fi}/N_{R,d}$ berechnet werden [6.30].

Für alle anderen Mauerwerksteine wird ein Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi}$ definiert. Dieser entspricht im Wesentlichen dem α_2 -Wert nach DIN 4102-4 (Ausgabe März 1994). Die Berechnung des Ausnutzungsfaktors musste jedoch für die Bemessung nach EC 6-1-2 angepasst werden, da die den Tabellen zu Grunde liegenden Brandversuche größtenteils mit Belastungen nach DIN 1053-1 durchgeführt wurden. Der Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi}$ berücksichtigt nun, dass die Bemessungswerte der Mauerwerkdruckfestigkeiten nach europäischer Normung von den bisherigen Werten nach DIN 1053-1 abweichen [6.31]. Weiterhin wird der Faktor ω eingeführt, der eine Anpassung der Versuchsergebnisse an die verschiedenen Steinarten vornimmt. Er ist definiert mit: $\omega = 0,7 \cdot f_k / \sigma_0$.

6.5.2 Vereinfachte Bemessungsverfahren

6.5.2.1 Allgemeines

Mit den vereinfachten Bemessungsverfahren wird in der Regel nachgewiesen, dass für die geforderte Feuerwiderstandsdauer t die maßgebenden Lasteinwirkungen $E_{fi,d}$ nach Eurocode 1 Teil 1-2 kleiner sind als der Bauteilwiderstand $R_{fi,d,t}$. Dafür werden u. a. Vereinfachungen bei

der Temperaturermittlung für die Bauteilquerschnitte und bei der Beschreibung des Versagenszustandes im Brandfall getroffen.

6.5.2.2 Eurocode 2 Teil 1-2

Mit dem im Eurocode 2 Teil 1-2, Anhang B.2 enthaltenen und im Nationalen Anhang für die Anwendung zugelassenen vereinfachten Bemessungsverfahren der Zonen-Methode, wird die Verringerung der Tragfähigkeit von Bauteilen unter Brandbeanspruchung durch die temperaturabhängige Verkleinerung der Bauteilquerschnitte und die temperaturbedingte Reduzierung der Festigkeitsbeiwerte für eine bestimmte Feuerwiderstandsdauer bestimmt (Bild 6.13). Durch die Reduzierung des Betonquerschnitts werden die äußeren, dem Brand direkt ausgesetzt und im Wesentlichen zermürbten Betonbereiche bei der Tragfähigkeitsermittlung nicht berücksichtigt. Mit dem Restquerschnitt kann unter Einbeziehung der temperaturbedingten Abminderung der Materialeigenschaften von Beton und Bewehrungsstahl der Tragfähigkeitsnachweis analog für Normaltemperatur nach [6.10] geführt werden.

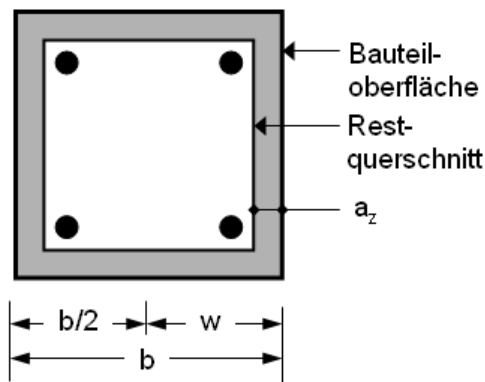


Bild 6.13 Restquerschnitt einer 4-seitig brandbeanspruchten Stahlbetonstütze nach Eurocode 2-1-2

Der reduzierte Bauteilquerschnitt und die temperaturabhängige Abminderung der Festigkeitsbeiwerte können für rechteckförmige oder aus Rechtecken zusammengesetzte Querschnittsformen mit Hilfe der im Eurocode 2-1-2, Abschnitt 4.2.4 und Anhang B.2 angegebenen Gleichungen und Diagrammen ermittelt werden.

Ein weiteres im Nationalen Anhang für die Anwendung zugelassenes vereinfachtes Bemessungsverfahren zur Berechnung der „heißen“ Tragfähigkeit von Einfeldträgern und durchlaufenden Balken sowie von Decken ist im informativen Anhang E des Eurocodes 2-1-2 angegeben. Das Näherungsverfahren ist besonders für Bauteile geeignet, bei denen der vorhandene Achsabstand der Bewehrung kleiner ist als der Wert, der in den Tabellen des Eurocodes 2-1-2 als Mindestwert gefordert wird. Voraussetzung für die Anwendung des vereinfachten Nachweisverfahrens ist, dass die Querschnittsabmessungen ansonsten mindestens den Werten der Tabellen des Eurocodes 2-1-2 entsprechen.

Die vereinfachten Bemessungsverfahren im Eurocode 2 Teil 1-2, Anhang B.1 (500°C Isothermen-Methode) und Anhang B.3 (Methode zur Beurteilung eines durch Biegemoment und

Längskraft beanspruchten Stahlbetonquerschnitts durch Abschätzung der Krümmung) werden im Nationalen Anhang zur Anwendung nicht zugelassen.

Für die Brandschutzbemessung von Stahlbeton-Kragstützen, für die aufgrund ihrer statisch-konstruktiven Randbedingungen Methode A nicht angewendet werden kann, enthält der Nationale Anhang vom Eurocode 2-1-2 im Anhang 1 ein vereinfachtes Nachweisverfahren für die Feuerwiderstandsklasse R 90, bei dem die Bemessung mit Hilfe von 4 sog. Standarddiagrammen durchgeführt werden kann. Die Standard-Diagramme gelten für Stahlbeton-Kragstützen

- aus Normalbeton der Festigkeitsklasse C30/37,
- mit Querschnittsabmessungen $h = 300 \text{ mm}$, $h = 450 \text{ mm}$, $h = 600 \text{ mm}$ und $h = 800 \text{ mm}$,
- mit einlagiger Bewehrung aus Betonstahl B500B, mit dem bezogenen Achsabstand der Längsbewehrung $u/h = 0,10$ und einem geometrischen Bewehrungsverhältnis von 2% und
- bei vierseitiger Brandbeanspruchung.

Durch eine Erweiterung des Anwendungsbereichs auf Randbedingungen, die von den Vorgaben in den Standarddiagrammen abweichen, kann ein großes Spektrum praxisrelevanter Anwendungsfälle abgedeckt werden.

6.5.2.3 Eurocode 3 Teil 1-2

In Eurocode 3 Teil 1-2 werden für vereinfachte rechnerische Nachweise von Bauteilen Näherungsverfahren auf Tragfähigkeitsebene und Temperaturebene bereitgestellt.

Beim Nachweis auf Tragfähigkeitsebene wird analog der Kaltbemessung im Brandfall der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (6.13)$$

mit

$E_{fi,d,t}$ Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall, ggf. einschließlich der Wirkung aus Temperaturdehnung und –verformung,

$R_{fi,d,t}$ zugehöriger Bemessungswert des Widerstandes im Brandfall (Indices: fi für fire; d für design; t für time).

Im Verfahren auf Tragfähigkeitsebene wird jedoch berücksichtigt, dass sich E-Modul und Fließgrenze durch die erhöhten Temperaturen verringert haben. Maßgeblich ist wie beim Verfahren auf Temperaturebene die Bemessungs-Stahltemperatur, die homogen über den Querschnitt und über die Stablängsachse angenommen wird. Diese Annahme liegt in bestimmten Fällen, z. B. bei Durchlaufträgern auf der sicheren Seite. Vereinfachend darf hier die Tragfähigkeit im Brandfall unter Berücksichtigung eines Anpassungsfaktors κ ermittelt werden.

Beim Nachweis auf Temperaturebene, dem θ_{cr} -Verfahren, wird gezeigt, dass die höchste im Brandfall auftretende Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ unterhalb der kritischen Stahltemperatur θ_{cr} bleibt. Die kritische Stahltemperatur θ_{cr} ist die Temperatur, bei der der Bauteilwiderstand gerade noch so groß ist wie die Beanspruchung infolge mechanischer Lasten.

$$\theta_{a,max} \leq \theta_{cr} \quad (6.14)$$

Zur Berechnung der Stahltemperaturen von ungeschützten und bekleideten Querschnitten im Gebäudeinneren werden in DIN EN 1993-1-2 Gleichungen angegeben, mit denen die Temperaturerhöhung $\Delta\theta_{a,t}$ im Zeitintervall Δt ermittelt wird. In [6.32] sind Näherungsgleichungen angegeben, mit denen die Bauteiltemperaturen in Abhängigkeit von der Branddauer und dem Profilmassfaktor bei Beanspruchung nach der Einheits-Temperaturzeitkurve ermittelt werden können (Bild 6.14). Stahltemperaturen außerhalb eines Gebäudes können nach EC 1-1-2 Anhang B ermittelt werden.

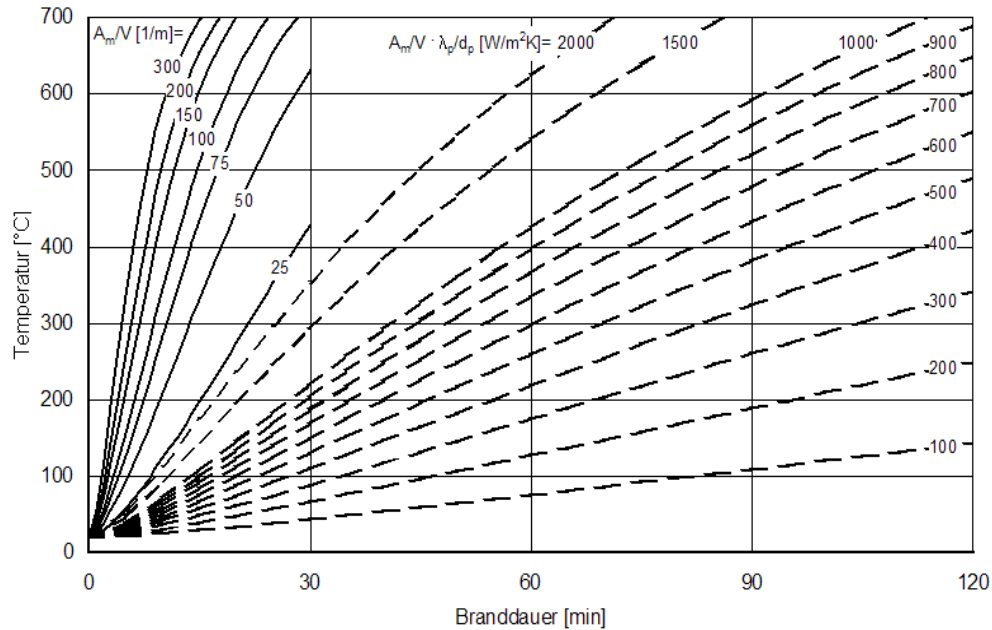


Bild 6.14 Temperaturen bei ETK-Beanspruchung in ungeschützten (A_m/V) und bekleideten Stahlprofilen ($A_p/V \cdot \lambda_p/d_p$) (nach [6.32])

Die kritische Stahltemperatur kann in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad bestimmt werden. Der Ausnutzungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis von Einwirkungen und Tragwiderstand zu Brandbeginn ($t = 0$):

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,t=0}} = \frac{\eta_{fi}}{\gamma_{M,20^\circ C}} = \frac{\eta_{fi}}{1,1} \quad (6.14)$$

Auf der sicheren Seite liegend darf der Abminderungsfaktor nach EC 3-1-2 2.4.2 (3) und Nationaler Anhang zu $\eta_{fi} = 0,65$ angesetzt werden, sodass $\mu_0 = 0,59$. Hierfür ergibt sich eine kritische Stahltemperatur von $557^\circ C$. Außer wenn Verformungskriterien oder Einflüsse aus Stabilität zu beachten sind, darf die kritische Stahltemperatur θ_{cr} unter Annahme einer gleichmäßigen Temperaturverteilung im Bauteil für den Ausnutzungsgrad μ_0 berechnet werden mit

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1\right) + 482 \quad (6.15)$$

mit

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (6.16)$$

μ_0 Ausnutzungsfaktor für Bauteile der Querschnittsklasse 1, 2 oder 3 nach Eurocode 3 Teil 1-1 sowie für Zugglieder,

$E_{fi,d}$ Beanspruchung im Brandfall,

$R_{fi,d,0}$ Bauteilwiderstand zum Zeitpunkt $t = 0$ min.

Bei Bauteilen ohne Stabilitätseinfluss darf mit $\gamma_{M, 20^\circ\text{C}} = 1,0$ gerechnet werden. Daraus folgt $\mu_0 = 0,65$ und eine kritische Temperatur $\theta_{\text{cr}} = 540$ °C.

Bei der brandschutztechnischen Bemessung sollten die Anschlüsse so dimensioniert werden, dass diese nicht höher ausgenutzt sind als die angeschlossenen Bauteile. Aufgrund der erhöhten Massigkeit im Bereich der Anschlüsse durch Schrauben, Steifen, Kopfplatten, etc. erfolgt die Erwärmung und auch die Abkühlung der Anschlüsse einschließlich der Verbindungsmittel in der Regel verzögert im Vergleich zu den angeschlossenen Bauteilen. In Eurocode 3 Teil 1-2 werden Vereinfachungen angegeben, die eine Bemessung ohne exakte Modellierung der Anschlüsse gestatten [6.33]. Sofern geschützte und ungeschützte Bauteile verbunden sind, darf der Anschluss gemäß des Entwurfs von EC 3-1-2 [6.34] dann als geschützt betrachtet werden, wenn die Bekleidung oder der Dämmschichtbildner mindestens 500 mm über den Anschluss hinausgeführt werden. Nach DIN 4102-4 ist für die Feuerwiderstandsklassen F 30 bis F 90 ein Bereich von 300 mm ausreichend, für die Feuerwiderstandsklasse F 120 bis F 180 werden 600 mm gefordert. Im Entwurf von EC 3-1-2 wird das vereinfachte Bemessungsverfahren für Querschnitte der Querschnittsklasse 4 modifiziert und aus dem informativen Anhang in den Normteil überführt. Das neue Verfahren verspricht höhere Tragfähigkeiten im Brandfall, weil anstatt auf die Proportionalitätsgrenze nunmehr auf die effektive Fließgrenze abgestellt wird. Für die Querschnittsklasse 4 mit Ausnahme von Zuggliedern ist es aber weiterhin auch möglich, den Nachweis über die kritische Temperatur mit $\theta_{\text{crit}} = 350^\circ\text{C}$ zu führen.

6.5.2.4 Eurocode 4 Teil 1-2

In Eurocode 4 Teil 1-2 werden vereinfachte Bemessungsverfahren für geschützte und ungeschützte Verbunddecken, Verbundträger mit und ohne Kammerbeton, Stahlträger mit Kammerbeton und Verbundstützen bereitgestellt.

Das in EC 4-1-2 Anhang D enthaltene vereinfachte Bemessungsverfahren für die Bemessung von Verbunddecken basiert auf [6.35]. Bei Verbunddecken ist im Gegensatz zu Trägern und Stützen neben der Tragfähigkeit auch der Raumabschluss nachzuweisen. Bei der Berechnung werden die positive und für Durchlaufsysteme die negative Momenten Tragfähigkeit nachgewiesen sowie das Wärmedämm-Kriterium überprüft. Die Querschnittstemperaturen werden getrennt für Ober-, Untergurt und Steg des Profilblechs sowie die Betonstahlbewehrung abhängig von der Betonart (Normal- oder Leichtbeton) und der angestrebten Feuerwiderstandsklasse vereinfacht berechnet. Die Biegemomenten Tragfähigkeit wird über entsprechende Abminderung der Materialfestigkeiten infolge der Erwärmung reduziert. Zurzeit werden Verbund-

decken in Deutschland über Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) geregelt, als deren Grundlage auch Brandprüfungen durchgeführt werden. Vergleichsrechnungen [6.36] haben ergeben, dass das Verfahren in EC 4-1-2 gegenüber den abZ zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führt.

In EC 4-1-2 Anhang F ist ein Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung kammerbetonierter Verbundträger angegeben. Bei diesem Verfahren wird der Temperatureinfluss für die Querschnittsbereiche oberer Stahlprofilgurt, Deckenplatte und Kammerbeton durch Flächenreduzierungen berücksichtigt. Für die übrigen Bereiche Stahlprofilsteg und -untergurt, Betonstahlbewehrung im Kammerbeton und in der Deckenplatte werden Reduktionsfaktoren für die Festigkeit in Abhängigkeit der Feuerwiderstandsdauer angegeben. Das Verfahren kann für Einfeld- und Durchlaufträger (durchlaufend betonierte Deckenplatte, Stahlprofil kann unterbrochen sein) für die Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 180 angewendet werden.

Die Tragfähigkeit von Verbundträgern ohne Kammerbeton, bei denen das Stahlprofil nicht höher als 500 mm und die Dicke der Betonplatte größer als 120 mm ist, kann mit Hilfe der kritischen Temperatur und der temperaturbedingten Reduktion der Stahlfestigkeit abgeschätzt werden. Für Verbundträger, deren Stahlprofil höher als 500 mm oder deren Betongurt kleiner als 120 mm ist, kann die Biegetragfähigkeit mit Hilfe des Traglastverfahrens ermittelt werden. Dazu werden in EC 4-1-2 Anhang E detaillierte Angaben gemacht.

In EC 4-1-2 Anhang G ist ein vereinfachtes Bemessungsverfahren beschrieben, bei dem die Temperaturberechnung durch vereinfachte Ansätze "überbrückt wird", indem für festgelegte Querschnittsbereiche in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsdauer und der Querschnittsmassigkeit die Festigkeitsabminderung direkt ermittelt wird. Zur Berechnung der plastischen Grenznormalkraft und der wirksamen Biegesteifigkeit im Brandfall wird der Querschnitt der Stütze in die Teilquerschnitte Flansche des Stahlquerschnitts, Steg des Stahlquerschnitts, Kammerbeton und Bewehrungsstäbe unterteilt. Bei diesem Verfahren wird der Stabilitätsverlust der Stütze infolge der temperaturabhängigen Steifigkeitsabnahme berücksichtigt [6.37]. Der Schlankheitseinfluss wird durch spezielle, für den Brandbeanspruchungszustand gültige Knickspannungskurven berücksichtigt [6.38].

Mit dem in EC 4-1-2 Anhang H enthaltenen vereinfachten Bemessungsverfahren können betongefüllte Hohlprofile mit einer Knicklänge bis 4,50 m und einer Breite zwischen 140 mm und 400 mm bei allseitiger Brandbeanspruchung nach der ETK bemessen werden. Die Berechnung der Temperaturverteilung im Querschnitt erfolgt mit einer thermischen Analyse nach dem allgemeinen Bemessungsverfahren. Die Bemessung der Grenztragfähigkeit erfolgt mit Hilfe von Traglastdiagrammen.

6.5.2.5 Eurocode 5 Teil 1-2

In Eurocode 5 Teil 1-2 wird das Tragverhalten von Holzbauteilen bei Brandbeanspruchung – neben der Temperaturentwicklung im Querschnitt – vor allem durch den Abbrand des äußeren, dem Feuer direkt ausgesetzten Querschnittsbereichs beeinflusst. Für die brandschutztechnische Bemessung tragender Holzbauteile werden zwei vereinfachte Bemessungsverfahren angeboten, die beide von der Abbrandrate v ausgehen und damit eine bestimmte Abbrandtiefe d nach t Minuten Brandbeanspruchung berechnen. Die Abbrandrate wird im Eurocode 5-1-2, Tabelle 3.1, in Abhängigkeit von der Holzsorte (Vollholz, Brettschichtholz, u. a.) vorgegeben.

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

Beim Δd -Verfahren bzw. bei der Methode mit reduzierten Querschnitten wird die Abbrandtiefe $d_{char,n}$ um einen Betrag $\Delta d = k_0 \cdot d_0$ erhöht (Bild 6.15). Der Betrag Δd berücksichtigt vereinfachend die infolge der erhöhten Temperaturen abzumindernden Werkstoffeigenschaften im Restquerschnitt. Der Tragfähigkeitsnachweis für den effektiven Restquerschnitt darf dann mit den Festigkeits- und Verformungseigenschaften bei Normaltemperatur durchgeführt werden. Der Betrag Δd wird in EC 5-1-2 Tabelle 4.1, als zeitabhängige Größe definiert. Dabei ist zusätzlich zu berücksichtigen, ob die beflammete Oberfläche geschützt oder ungeschützt dem Feuer ausgesetzt wird.

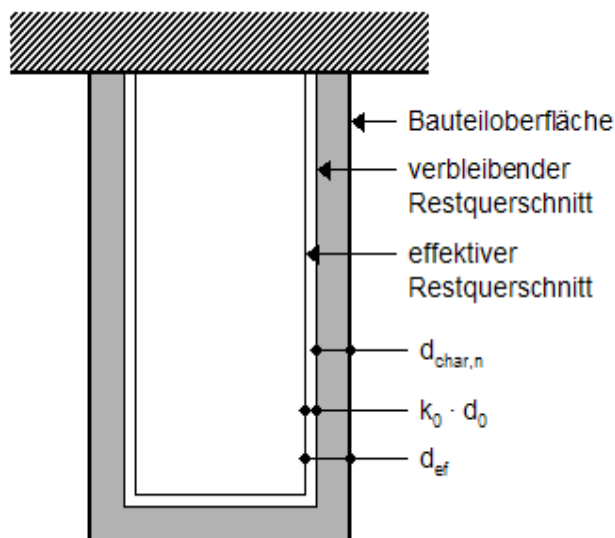


Bild 6.15 Restquerschnitt für stabförmige Holzbauteile

Alternativ kann für Nadelholz mit rechteckigem Querschnitt und drei- oder vierseitiger Normbrandbeanspruchung und Rundhölzern mit allseitiger Normbrandbeanspruchung das T_m -Verfahren bzw. die Methode mit reduzierten Werkstoffeigenschaften angewendet werden. Die brandschutztechnische Bemessung wird mit dem verbleibenden Restquerschnitt nach Bild 6.15 durchgeführt. Für die temperaturabhängige Reduzierung der Biege-, Druck- und Zugfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls werden Rechenfunktionen in Abhängigkeit vom Verhältnis des beflamnten Umfangs des Restquerschnitts zur Fläche des Restquerschnitts angegeben.

Anwendungsregeln für auf Abscheren beanspruchte Verbindungen sind in EC 5-1-2 in den Kapiteln 6.2 und 6.3 angegeben. Die Regeln gelten ausschließlich für zweiseitige Verbindungen mit einem symmetrischen Aufbau. Auch hier existieren zwei Alternativen der Nachweisführung. Zum einen werden bei der vereinfachten Methode in EC 5-1-2 Tabelle 6.1 Feuerwiderstandsdauern bis maximal 20 Minuten angegeben, die bei Normaltemperatur gemäß EC 5-1-1 bemessen wurden. Die Feuerwiderstandsdauern können erhöht werden, indem die Abmessungen gegenüber den erforderlichen Werten nach EC 5-1-1 vergrößert werden. Es können somit Feuerwiderstandsdauer von maximal 30 Minuten nachgewiesen werden. Alternativ können durch die Methode mit reduzierten Beanspruchungen ohne eine Erhöhung der Bauteilabmessungen höhere Feuerwiderstandsdauern bis maximal 40 Minuten erreicht werden. Für höhere Feuerwiderstandsdauern bis maximal 60 Minuten müssen analog zur vereinfachten Methode die Bauteilabmessungen erhöht werden. Eine weitere Verbesserung der

Feuerwiderstandsdauer ist durch die Anordnung einer Bekleidung möglich. Bemessungsregeln für auf Herausziehen beanspruchte Schrauben sind in 6.4 des EC 5-1-2 dargestellt. Für zimmermannsmäßige Verbindungen existieren im EC 5-1-2 keine Bemessungsregeln.

Im informativen Anhang E zu EC 5-1-2 sind für raumabschließende Konstruktionen Näherungsverfahren zum Nachweis der Temperaturerhöhung $\Delta T \leq 140 \text{ K}$ und $\Delta T \leq 180 \text{ K}$ auf der dem Feuer abgewandten Seite angegeben. In Abhängigkeit von der jeweiligen raumseitigen und feuerabgewandten Bekleidung, der Dämmung in den Hohlräumen der Bauteile sowie der Dimensionierung der Stützen, Deckenbalken und Sparren, kann die jeweilige Feuerwiderstandsdauer rechnerisch ermittelt werden. Als Beplankungsmaterialien sind dabei Gipsbauplatten und Holzwerkstoffe, als Dämmung im Regelfall mineralische Faserdämmstoffe verwendbar. Bei der rechnerischen Ermittlung des Feuerwiderstands der Bauteile ist der Temperaturfluss an den unterschiedlichen Stellen der Querschnitte nach Bild 6.16 zu berücksichtigen.

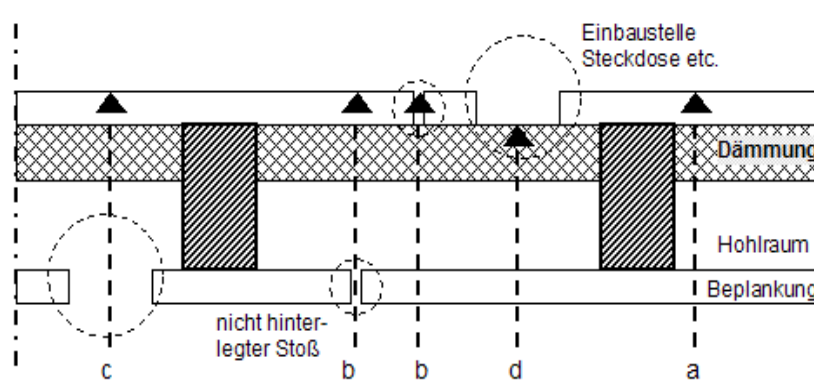


Bild 6.16 Temperaturfluss in den Schnitten a – d durch eine raumabschließende Holzkonstruktion

Der „first draft“ zur Überarbeitung des EC 5-1-2 [6.39] kündigt für die brandschutztechnische Bemessung von Holzbauteilen einige Neuerungen an. Zum einen hat man sich darauf verständigt, dass mit allen Bemessungsverfahren eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 90 Minuten nachgewiesen werden kann. Zudem werden gegenüber der Ausgabe des EC 5-1-2 aus dem Jahr 2010 voraussichtlich wieder Bemessungstabellen als erste Stufe der Brandschutzbemessung aufgenommen. Art und Umfang der Bemessungstabellen sind noch nicht abschließend geklärt, so dass hierzu noch keine weiteren Angaben gemacht werden können.

Im Zuge einer Vereinfachung der Eurocodes war es von Anfang an Ziel der Überarbeitung, dass von den beiden gleichberechtigten vereinfachten Bemessungsverfahren der Stufe 2 eines gestrichen wird. Da das Verfahren mit reduziertem Querschnitt universell für Nadel- und Laubholz mit rechteckigem und rundem Querschnitt bei verschiedenen Beflammungssituationen anwendbar ist, während das Verfahren mit reduzierten Eigenschaften nur bei 3- oder 4-seitig beflamnten rechteckigen Querschnitten und allseitig beflamnten runden Querschnitten aus Nadelholz angewendet werden darf, ist im „first draft“ nur noch das Verfahren mit reduziertem Querschnitt enthalten. Dies ist insofern bemerkenswert, da das Verfahren mit reduzierten Eigenschaften in einigen Bereichen zu wirtschaftlicheren Ergebnissen führte. Das enthaltene Verkohlungsmodell wird durch zusätzliche Gleichungen zur Bestimmung der Versagenszeit von Brandschutzbekleidungen erweitert.

Neu aufgenommen wird ein vereinfachtes Verfahren zur Bemessung von Brettsperrholzelementen, welches auf dem Verfahren mit reduziertem Querschnitt beruht. Dabei werden die Fälle unterschieden, ob zum einen das Brettsperrholz anfänglich durch eine Bekleidung vor der Verkohlung geschützt ist oder nicht und ob zum anderen die Klebefuge thermisch beständig ist oder bei Temperatureinwirkung frühzeitig versagt.

Die bislang in den informativen Anhängen C und D enthaltenden Verfahren zur Bestimmung der Abbrandrate von Wandstielen und Deckenbalken in vollgedämmten und ungedämmten Konstruktionen wurden überarbeitet und werden zukünftig im Hauptteil des Eurocodes 5-1-2 enthalten sein. Gleiches gilt für den Anhang E zur Berechnung der raumabschließenden Funktion von Wand- und Deckenbauteilen. Darüber hinaus wurden die Regeln zur Berechnung von Verbindungen und Bauteilanschlüssen überarbeitet.

Für den „second draft“ ist ferner vorgesehen ein Bemessungsverfahren für Holz-Beton-Verbunddecken (HBV) aufzunehmen (s. Kap. 6.7.9). Derzeit erfolgt die Bemessung in erster Linie auf Grundlage der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen des Verbundmittels unter Berücksichtigung der allgemeinen Bemessungsgrundlagen der Eurocodes 1, 2 und 5. Es erschweren jedoch die fehlenden normativen Bemessungsgrundlagen eine vollständige Beurteilung der Tragfähigkeit von HBV-Konstruktionen, was zukünftig durch das Erscheinen einer europäischen Produktnorm und für die Brandschutzbemessung durch die Aufnahme in den EC 5-1-2 geändert werden soll.

6.5.2.6 Zusammenfassung vereinfachte Bemessungsverfahren

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit den vereinfachten Bemessungsverfahren der Brandschutzteile der Eurocodes 2 bis 5 die Tragfähigkeit der Bauteile unter Normbrandbeanspruchung für eine vorgegebene Feuerwiderstandsdauer ermittelt werden kann. Die Nachweisverfahren liefern keine Aussagen über die im Brandfall entstehenden Verformungen. Der Raumabschluss und die Wärmedämmung (ΔT -Kriterium) können – bis auf Eurocode 5-1-2 – nicht nachgewiesen werden. Ebenfalls fehlen Nachweisverfahren für das Schub- und Verbundtragverhalten sowie für das Abplatzverhalten bei Stahlbetonbauteilen.

6.5.3 Erweiterte Bemessungsverfahren

6.5.3.1 Allgemeines

Erweiterte Bemessungsverfahren können für den brandschutztechnischen Nachweis von Einzelbauteilen, Teil- und Gesamttragwerken mit beliebiger Querschnittsart und -form und bei voller oder lokaler Temperaturbeanspruchung angewendet werden. Für den Nachweis werden Rechengrundlagen zur Ermittlung der Temperatur- und Lasteinwirkungen benötigt. Sie befinden sich in Eurocode 1 Teil 1-2. Weiterhin werden Angaben über die temperaturabhängige Veränderung der thermo-mechanischen Eigenschaften der Baustoffe (Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit, thermische Dehnung, usw.) benötigt. Dazu finden sich Angaben in der Fachliteratur und den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 (Beton), 3 (Stahl) und 4 (Verbundbau). Keine oder nur sehr generelle Angaben enthalten die Brandschutzteile der Eurocodes 5 (Holz) und 6 (Mauerwerk). In den folgenden Ausführungen wird deshalb schwerpunktmäßig auf Beton-, Stahl- und Verbundbauteile eingegangen.

Bei der Festlegung der Bauteilabmessungen muss darauf geachtet werden, dass mögliche – jedoch nicht durch das erweiterte Bemessungsverfahren abgedeckte Versagensart (z. B. unzureichende Rotationskapazität, Abplatzen oder Abfallen von Betondeckungen, lokales Beulen oder Knicken, Schub- und Verbundversagen sowie Verankerungsbruch) durch geeignete Bemessung und konstruktive Maßnahmen verhindert werden.

Für die Berechnung von zentrisch belasteten Stützen ist gemäß third draft des EC 2-1-2 [6.26] eine Imperfektion mit sinusförmigem Verlauf und einem Stich von $L/1000$ anzusetzen. Für exzentrisch belastete Stützen kann eine Imperfektion vernachlässigt werden. Gleiches gilt nach EC 3-1-2 [6.3] für Stahlstützen.

Erweiterte Bemessungsverfahren dürfen nach dem Nationalen Anhang zu Eurocode 1-1-2 für brandschutztechnische Nachweise von Einzelbauteilen, Tragwerken und Gesamttragwerken nur angewendet werden, wenn diese validiert sind. Entsprechende Validierungsbeispiele befinden sich im Anhang CC des Nationalen Anhangs und werden in Kapitel 6.5.5.3 des Leitfadens erläutert. Die Nachweise sollten von einem hierfür qualifizierten Prüfsachverständigen geprüft werden.

6.5.3.2 Abnehmende Bauteiltemperaturen

Mit den in Kapitel 5 des Leitfadens dargestellten Verfahren kann der Verlauf der Heißgastemperaturen für einen natürlichen Brandverlauf mit ansteigenden und abfallenden Temperaturen wiedergegeben werden. Als Folge der zurückgehenden Heißgastemperaturen kühlt der Bauteilquerschnitt zunächst nur außen ab, bei fortschreitender Dauer dann auch in weiter innen liegenden Querschnittsbereichen. Die instationäre Querschnittserwärmung wird zu einer instationären Querschnittsabkühlung. Für die rechnerische Erfassung der abnehmenden Bauteiltemperaturen müssen die in Kapitel 6.3 dargestellten thermischen Materialgesetze von verändert werden. Beispielsweise ist der Verdampfungsvorgang des Porenwassers im Beton kein reversibler Vorgang, sodass die in Bild 6.5 angegebene Definition für die spezifische Wärmekapazität nur für mit der Zeit ansteigende Temperaturverläufe gilt.

Für abnehmende Bauteiltemperaturen muss grundsätzlich mit irreversiblen thermischen Materialgesetzen gerechnet werden. In [6.40] wird zur Berechnung der abnehmenden Bauteiltemperaturen vorgeschlagen, vom Wendepunkt der Temperaturen (Punkt K in Bild 6.17) mit der an die maximale Temperatur gekoppelten Temperaturleitzahl a bis zur völligen Abkühlung zu rechnen.

Die Auswirkungen der irreversiblen thermischen Materialkennwerte auf die Temperaturverteilung in einem quadratischen Betonquerschnitt mit $b = 200$ mm zeigt Bild 6.18. Dargestellt sind die Isothermen nach 60 Minuten Branddauer: die dicken Linien gelten mit Berücksichtigung, die dünnen Linien ohne Berücksichtigung der irreversiblen thermischen Materialkennwerte.

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

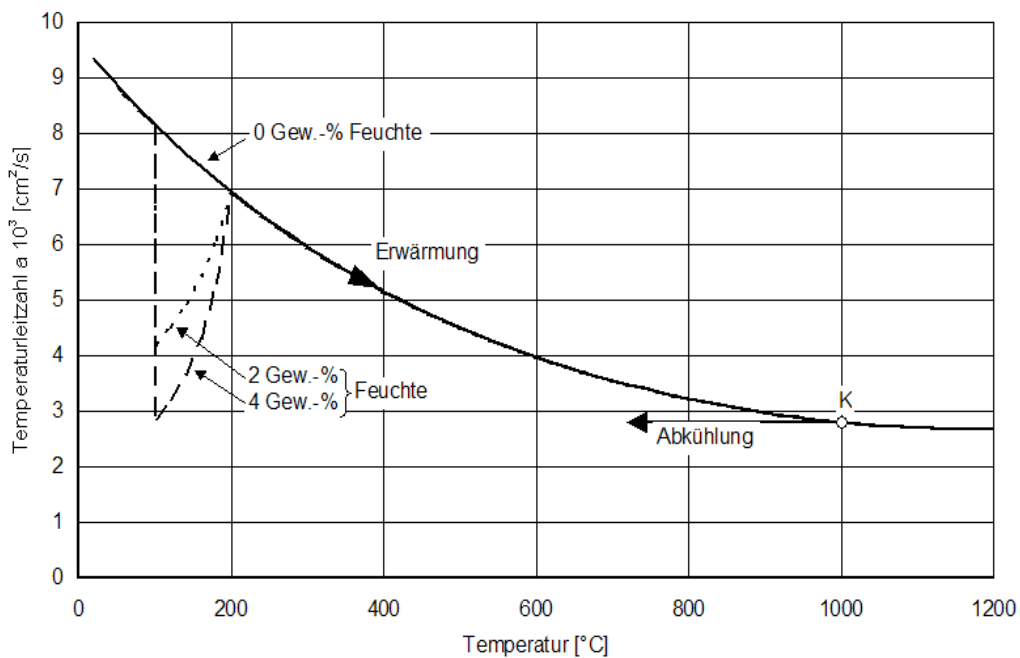


Bild 6.17 Temperaturleitzahl α von Normalbeton mit vorwiegend quarzitäen Zuschlägen für die Erwärmungs- und Abkühlphase

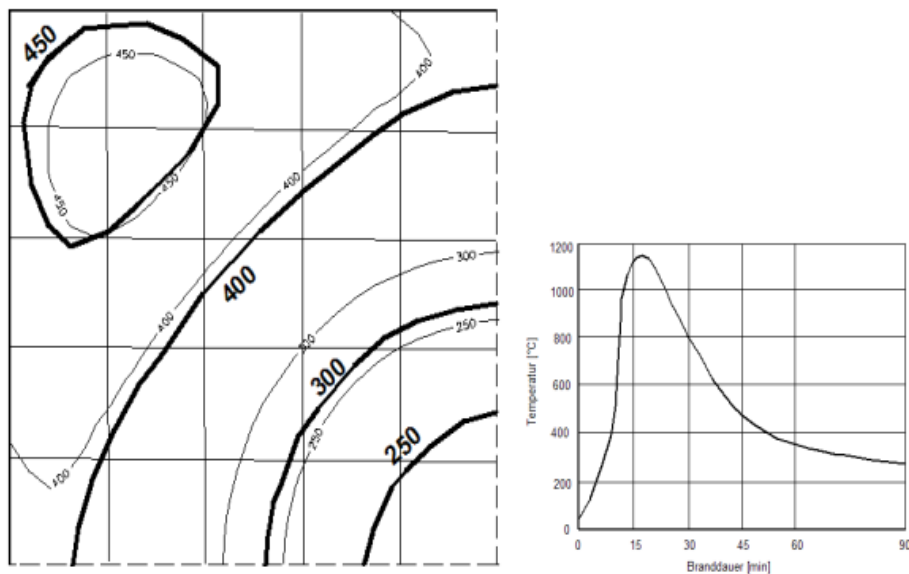


Bild 6.18 links: Isothermen nach 60 Minuten Branddauer mit (dick) und ohne (dünn) Berücksichtigung der irreversiblen thermischen Materialkennwerte; rechts: Heißgastemperaturen

Die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien und die thermischen Dehnungen der Eurocodes basieren auf Auswertungen von Materialuntersuchungen bei hohen Temperaturen. Den Spannungs-Dehnungslinien liegen Messwerte aus Hochtemperatur-Kriechversuchen und den thermischen Dehnungen Messwerte aus Erwärmungsversuchen mit konstanter Aufheizgeschwindigkeit zu Grunde. Dadurch sind beispielsweise in den Dehnungen der Spannungs-Dehnungslinien sowohl temperaturabhängige elastische und plastische Anteile als auch die

sehr viel größeren instationären Hochtemperatur-Kriechanteile enthalten [6.41]. Aus den Materialuntersuchungen und den anschließenden Auswertungen ergeben sich Einschränkungen hinsichtlich der Anwendung der Spannungs-Dehnungslinien und der thermischen Dehnungen.

Die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien sind

- nur für Erwärmungsgeschwindigkeiten zwischen 2 und 50 K/min,
- nur für ansteigende Bauteiltemperaturen ($\delta T/\delta t \geq 0$) und
- nicht zur Berechnung von Zwangkräften in dehnbehinderten Bauteilen

geeignet.

Die thermischen Dehnungen sind nur für ansteigende Bauteiltemperaturen ($\delta T/\delta t \geq 0$) geeignet.

Die Einschränkungen müssen bei der Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von Bauteilen und Tragwerken beachtet werden. Insbesondere bei Brandbeanspruchungen nach Kapitel 5 des Leitfadens, bei denen durch Einsatz von Brandsimulationsmodellen Heißgastemperaturen ermittelt werden, die einen natürlichen Brandverlauf mit ansteigenden und abfallenden Temperaturen wiedergeben.

Für den Fall, dass die brandschutztechnische Bemessung der Bauteile und Tragwerke auf der Grundlage eines natürlichen Brandverlaufs durchgeführt werden soll, wird in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2, 3 und 4 die Anwendung alternativer oder modifizierter Spannungs-Dehnungslinien und thermischer Dehnungen empfohlen. Sie müssen durch Versuche abgesichert sein. Zusätzlich werden Näherungen angeboten, die im Folgenden zusammengestellt und erläutert werden.

Durch die rasch ansteigenden Heißgastemperaturen können bei Stahlbeton-, Spannbeton- und Verbundbauteilen in den ersten Minuten der Brandbeanspruchung Erwärmungsgeschwindigkeiten von über 50 K/min in der äußeren, direkt beflammten Randzone auftreten. In dieser nur wenige Zentimeter breiten Randzone wird dann sehr schnell die temperaturbedingte Materialentfestigung einsetzen, wodurch der Anteil der Randzone an der Tragfähigkeit des Gesamtquerschnitts reduziert wird. Erwärmungsgeschwindigkeiten von weniger als 2 K/min werden für längere Branddauern nur im Querschnittsinneren, insbesondere bei massigen Querschnitten, auftreten. Für diese Querschnittsbereiche bleiben die Temperaturen über die gesamte Brandbeanspruchung annähernd bei der Ausgangstemperatur, sodass hier die Spannungs-Dehnungslinie für $T \approx 20 \text{ °C}$ ohne Einschränkungen angewendet werden kann. Bei Stahlbauteilen werden Erwärmungsgeschwindigkeiten von über 50 K/min nur in ungeschützten Konstruktionen auftreten, bei denen das Versagen dann nach weniger als 15 Minuten Branddauer auftritt. Bei geschützten Stahlbauteilen werden Erwärmungsgeschwindigkeiten zwischen 2 K/min und 50 K/min in der Regel eingehalten.

Für Berechnungen mit abfallenden Bauteiltemperaturen ($dT/dt < 0$) enthalten die Brandschutzteile von Eurocode 2 und Eurocode 4 Näherungsansätze. Danach dürfen die Spannungs-Dehnungslinien für Baustahl und warmgewalzten Betonstahl als hinreichend genaue Näherung für ansteigende und abfallende Stahltemperaturen verwendet werden. Für Beton werden in Eurocode 4-1-2 im informativen Anhang C Spannungs-Dehnungsbeziehungen an-

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

gegeben, die an natürliche Brände mit Abkühlphase angepasst sind. Der Scheitelwert der Betondruckfestigkeit wird bei Abkühlung in Abhängigkeit von der erreichten maximalen Temperatur reduziert. Bild 6.19 zeigt temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien bis zur maximalen Temperatur $\theta_{\max} = 400 \text{ °C}$ und der anschließenden Abkühlung bis $\theta_{\max} = 20 \text{ °C}$. Bei diesem Näherungsansatz bleiben die während der Abkühlung auftretenden irreversiblen Stauchungen unberücksichtigt [6.40].

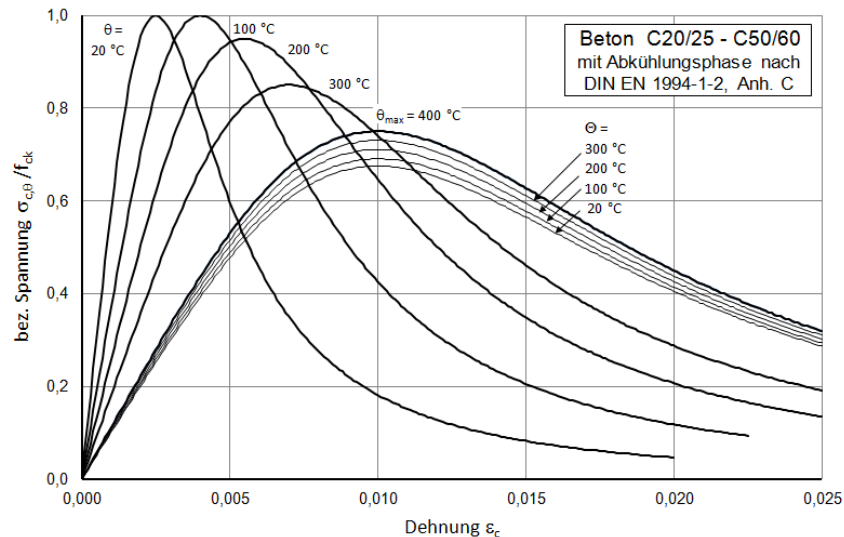


Bild 6.19 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Beton mit Abkühlphase nach Eurocode 4-1-2, Anhang C

Rechenhinweise hinsichtlich der Verformungen und der thermischen Dehnungen bei abfallenden Temperaturen sind in den Eurocodes nicht enthalten. In [6.42] sind einige Messergebnisse von instationären Hochtemperatur-Kriechversuchen mit Betonproben veröffentlicht. Sie zeigen in Abhängigkeit von der erreichten maximalen Temperatur ausgeprägte irreversible bleibende Dehnungen. Bild 6.20 zeigt, dass bei Erwärmung auf ca. 800 °C nach dem Abkühlen bei unbelasteten Proben bleibende Dehnungen von ca. 4 mm/m auftreten (Kurve 1). Werden die Versuche mit 10 % (Kurve 2) oder 60 % (Kurve 3) Lastausnutzung durchgeführt betragen die bleibenden Dehnungen im wiedererkalteten Zustand ca. -5 mm/m .

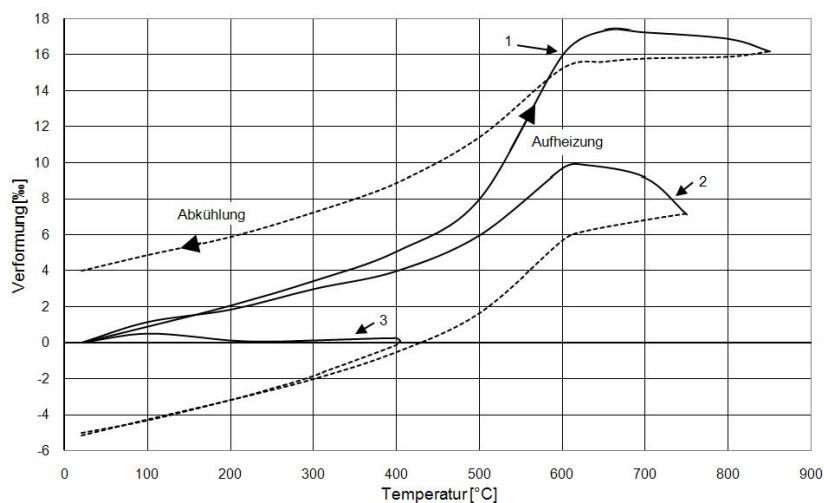


Bild 6.20 Dehnungen von Normalbeton nach dem Aufheizen und Abkühlen

Zur Untersuchung des Materialverhaltens von Beton unter Naturbrandbeanspruchung, wurden im Rahmen von [6.43] drei praxisrelevante Betonrezepturen verwendet [6.44], [6.45], [6.46]. Hierbei handelt es sich um Normalbeton (C 30/37), hochfesten Beton (C 80/95) und ultrahochfesten Beton mit einer Druckfestigkeit größer 150 N/mm². Neben den thermischen Materialkennwerten (Rohdichte, spezifische Wärmekapazität, thermische Leitfähigkeit) wurde das Festigkeitsverhalten in der Abkühlphase durch stationäre Druckversuche und das Verformungsverhalten durch instationäre Warmkriechversuche untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in Abhängigkeit der betrachteten Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte, thermische Dehnung, Festigkeitsreduzierung, etc.) unterschiedlich stark ausgeprägte Unterschiede zwischen den Materialkennwerten der Aufheizphase und der Abkühlphase vorliegen. Ferner muss berücksichtigt werden, dass Naturbrände vielfältig verlaufen können.

Zusammenfassend gilt für die Spannungs-Dehnungslinien im Bereich abfallender Temperaturen, dass die Betondruckfestigkeit abgemindert werden muss und für Baustahl und warmgewalzten Betonstahl die Rechengrundlagen für ansteigende Temperaturen unverändert übernommen werden können. Für kaltverformten Betonstahl und für kaltgezogenen und vergüteten Spannstahl liegen im Bereich abfallender Temperaturen keine gesicherten Spannungs-Dehnungslinien vor. Deshalb können die rechnerischen brandschutztechnischen Nachweise für Bauteile mit diesen Baustoffen nur bis zum Erreichen der maximalen Temperatur geführt werden.

Für die Verformungen und thermischen Dehnungen von Beton liegen im Bereich abfallender Temperaturen keine ausreichenden Versuchswerte vor, um abgesicherte Rechenannahmen festlegen zu können. Es wird deshalb als grobe Näherung vorgeschlagen, für die Erwärmung und Abkühlung von Beton die gleichen thermischen Dehnungen zu verwenden. Diese Vorgehensweise kann auch für die thermischen Dehnungen von Betonstahl, Spannstahl und Baustahl angewendet werden. Durch die Näherungen kann nur das Tragverhalten der brandbeanspruchten Bauteile und Tragwerke annähernd zutreffend wiedergegeben werden, das Verformungsverhalten kann nur unzureichend oder gar nicht erfasst werden. Dadurch kann die Forderung aus den Brandschutzteilen der Eurocodes, dass die berechneten Verformungen hinsichtlich ihrer Verträglichkeit mit Auflagerbedingungen und angrenzenden Tragwerksteilen überprüft werden müssen, nur mit Einschränkungen und erheblichen Schwierigkeiten durchgeführt werden.

6.5.3.3 Thermische Materialeigenschaften von Brandschutzbekleidungen und reaktiven Brandschutzsystemen

Im Rahmen von [6.47] sind temperaturabhängige Materialeigenschaften von Brandschutzbekleidungen und reaktiven Brandschutzsystemen bei Naturbrandbeanspruchung und Empfehlungen für die Anwendung von geeigneten Prüfverfahren zur Bestimmung dieser entwickelt worden. Es sind die folgenden Brandschutzmaterialien untersucht worden:

- Gipskartonfeuerschutzplatten,
- Gipsfaserplatten,
- Calciumsilikatplatten,
- lösemittelhaltige und wasserbasierte reaktive Brandschutzsysteme.

Bisher existierten nur für ausgewählte Brandschutzmaterialien temperaturunabhängige Materialkennwerte, die auf Bauteilversuchungen unter Brandeinwirkung der ETK basierten [6.8]. In [6.47] wurden thermische Materialkennwerte für verschiedene Brandschutzbekleidungen, -putze und reaktive Brandschutzsysteme im Labormaßstab untersucht und anhand eines Großbrandversuches kalibriert und validiert.

Dabei zeigte sich, dass die thermischen Materialeigenschaften von Brandschutzbekleidungen und reaktiven Brandschutzsystemen irreversibel sind und für die Aufheiz- und Abkühlphase bestimmt werden müssen. Zusätzlich zeigte sich, insbesondere in der Aufheizphase, eine Heizratenabhängigkeit der thermischen Materialeigenschaften von Brandschutzbekleidungen und reaktiven Brandschutzsystemen. Temperaturunabhängige konstante Werte für die thermischen Materialeigenschaften decken das thermische Materialverhalten nicht realitätsnah ab. In Bild 6.21 erfolgt eine vergleichende Betrachtung zwischen den in einem realmaßstäblichen Versuch ermittelten und den durch Simulationen berechneten Stahltemperaturen am selben Temperaturmesspunkt. Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wurden die im EC 3-1-2 enthaltenen, sowie in [6.47] ermittelten Materialkennwerte verwendet.

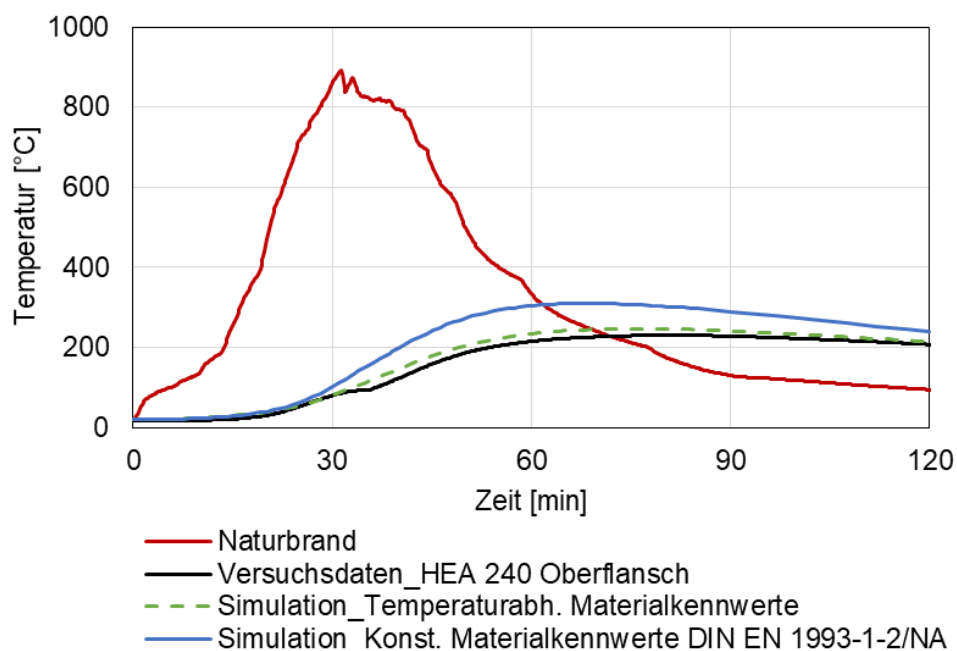


Bild 6.21 Vergleichende Betrachtung zwischen Versuchsdaten und berechneten Querschnittstemperaturen bei Verwendung der konstanten Eurocode Materialkennwerte und in [6.47] ermittelten temperaturabhängigen Materialkennwerten

Empfehlungen für geeignete Prüfverfahren und thermoanalytische Messmethoden wurden in [6.47] zusammengefasst.

6.5.4 Anwendungshilfen

6.5.4.1 Allgemeines

Da die Eurocodes Nachweisverfahren in drei Ebenen anbieten (Tabellarische Bemessungsverfahren, vereinfachte Bemessungsverfahren, allgemeine Bemessungsverfahren) hat der Anwender häufig die Wahl zwischen formell gleichwertigen Nachweisen. Dabei steigt je Ebene der Rechenaufwand, jedoch auch die Genauigkeit der Ergebnisse an. Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht, welche Rechenverfahren für welche Bauteile zur Verfügung stehen und geben Hinweise, welche Besonderheiten für die jeweilige Nachweisführung zu beachten sind und ob der erhöhte Rechenaufwand gerechtfertigt ist.

6.5.4.2 Eurocode 2 Teil 1-2

Tabelle 6.4: Übersicht der Nachweisalternativen EC 2-1-2

Bauteil	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Anmerkung:
Stat. best. gelagerte Balken	EC 2-1-2; Tabelle 5.5 für ETK	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK EC 2-1-2; Anhang E für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	A
Stat. unbest. gelagerte Balken	EC 2-1-2; Tabelle 5.6 (und 5.7) für ETK	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK EC 2-1-2; Anhang E für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	A
Vierseitig brandbeanspr. Balken	EC 2.1.2; Kap. 5.6.4	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	A
Stat. best. gelagerte Platten	EC 2-1-2; Tabelle 5.8 für ETK	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK EC 2-1-2; Anhang E für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	A
Stat. unbest. gelagerte Platten	EC 2-1-2; Tabelle 5.8 für ETK	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK EC 2-1-2; Anhang E für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	A
Flachdecken	EC 2-1-2; Tabelle 5.9 für ETK	--/--	--/--	B
Stat. best. gelagerte Rippendecken	EC 2-1-2; Tabelle 5.10 für ETK	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK EC 2-1-2; Anhang E für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	A
Stat. unbest. gelagerte Rippendecken	EC 2-1-2; Tabelle 5.11 für ETK	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK EC 2-1-2; Anhang E für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	A
Geschossstützen	EC 2-1-2; Tabelle 5.2a für ETK	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	C
Kragstützen	--/--	EC 2-1-2/NA; Anhang AA	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	D
Nichttragende, raumabschl. Wände	EC 2-1-2; Tabelle 5.3	--/--	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	
Tragende Wände	EC 2.1.2; Tabelle 5.4	EC 2-1-2; Anhang B.2 für ETK	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	E
Brandwände	EC 2-1-2; Kap. 5.4.3	--/--	--/--	F
Zugglieder	EC 2-1-2; Kap. 5.5 mit Tabelle 5.5	--/--	EC 2-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NB	

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

NB: Naturbrand

- Zu A) Zunächst sollte bei ETK-Beanspruchung der Tabellennachweis nach Ebene 1 geführt werden. Die Ebenen 2 und 3 sind nur sinnvoll, wenn die Randbedingungen der Tabelle nicht eingehalten werden, bzw. die Ebene 1 nicht zum gewünschten Erfolg führt. Die 500°C Isothermen-Methode nach Anhang B.1 als alternatives vereinfachtes Bemessungsverfahren wurde über den NA nicht zugelassen. Als vereinfachte Bemessungsverfahren stehen Anhang B.2 (Zonenmethode) und Anhang E zur Verfügung. *)
- Zu B) Für Flachdecken bietet der EC 2-1-2 lediglich eine Tabellenbemessung an. Die vereinfachten Bemessungsverfahren dürfen nicht angewendet werden, da der Durchstanznachweis im Brandfall maßgebend werden kann. Auch bei Anwendung des allgemeinen Bemessungsverfahrens ist der Nachweis gegen Durchstanzen äußerst schwierig, da das Schubverhalten im Brandfall noch nicht abschließend untersucht ist.
- Zu C) Tabelle 5.2a gilt nur für Geschossstützen eines horizontal ausgesteiften Tragwerkes, für die im Brandfall eine Rotationsbehinderung angesetzt werden kann. Die Zonenmethode gemäß Anhang B.2 ist für den Nachweis von Stützen nicht validiert. Bei Anwendung der Zonenmethode für den Stütznachweis sollten die zusätzlich erforderlichen Annahmen in der Literatur veröffentlicht sein (s. EC 2-1-2/NA, NCI zu „Anhang B Vereinfachte Berechnungsmethoden“). *)
- Zu D) Tabelle 5.2a gilt nicht für Kragstützen. Für den brandschutztechnischen Nachweis von Kragstützen finden sich im Anhang AA des Nationalen Anhangs zum EC 2-1-2 Bemessungsdiagramme, die den Einfluss aus Theorie 2. Ordnung berücksichtigen. *)
- Zu E) Zunächst sollte bei ETK-Beanspruchung der Tabellennachweis nach Ebene 1 geführt werden. Für raumabschließende Wände ist eine einseitige Brandbeanspruchung zu unterstellen, für nicht raumabschließende Wände eine zweiseitige. Die Zonenmethode gemäß Anhang B.2 ist für den Nachweis von Wänden nicht validiert. Bei Anwendung der Zonenmethode sollten die zusätzlich erforderlichen Annahmen in der Literatur veröffentlicht sein (s. EC 2-1-2/NA, NCI zu „Anhang B Vereinfachte Berechnungsmethoden“). *)
- Zu F) Der Nachweis der mechanischen Stoßbeanspruchung kann ausschließlich über Tabellen geführt werden. Auch das allgemeine Bemessungsverfahren liefert hierfür noch keine abgesicherten Ergebnisse.
- *) Bei Naturbrandbeanspruchung ist ausschließlich das allgemeine Bemessungsverfahren möglich. Bei Anwendung der Zonenmethode müssen die Gleichungen (B.11) bis (B.13) ausgewertet werden, die Reduktion der Druckfestigkeit und des Querschnitts nach Bild B.5 gilt nur für eine Brandbeanspruchung entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve.

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

6.5.4.3 Eurocode 3 Teil 1-2

Tabelle 6.4: Übersicht der Nachweisalternativen EC 3-1-2

Bauteil	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3
Zugglieder	--/--*	EC 3-1-2; Kap. 4.2.3.1 für ETK und NA EC 3-1-2; Kap. 4.2.4 für ETK und NA	EC 3-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NA
Druckbeanspruchte Bauteile (QKL 1-3)	--/--*	EC 3-1-2; Kap. 4.2.3.2 für ETK und NA EC 3-1-2; Kap. 4.2.4** für ETK und NA	EC 3-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NA
Biegeträger (QKL 1, 2)	--/--*	EC 3-1-2; Kap. 4.2.3.3 für ETK und NA EC 3-1-2; Kap. 4.2.4** für ETK und NA	EC 3-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NA
Biegeträger (QKL 3)	--/--*	EC 3-1-2; Kap. 4.2.4 für ETK und NA EC 3-1-2; Kap. 4.2.4** für ETK und NA	EC 3-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NA
Biege- und druckbeanspruchte Bauteile (QKL 1-3)	--/--*	EC 3-1-2; Kap. 4.2.3.5 für ETK und NA EC 3-1-2; Kap. 4.2.4** für ETK und NA	EC 3-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NA
Biege- und druckbeanspruchte Bauteile (QKL 4)	--/--*	EC 3-1-2; Kap. 4.2.3.6 für ETK und NA EC 3-1-2; Kap. 4.2.4** für ETK und NA	EC 3-1-2; Kap. 4.3 für ETK und NA
QKL: Querschnittsklasse			
NB: Naturbrand			
*: Ebene 1 (tabellarisches Nachweisverfahren) existiert für den EC 3-1-2 nicht, alternativ Euronogramm anwendbar (siehe Kapitel 6.5.4 vfdb-Leitfaden)			
**: nur anwendbar, wenn Verformungskriterien oder Einflüsse aus Stabilitätsproblemen ausgeschlossen sind			

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

6.5.4.4 Eurocode 4 Teil 1-2

Tabelle 6.5: Übersicht der Nachweisalternativen EC 4-1-2

Bauteil	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3
Verbundträger ohne Betonüberdeckung des Stahlquerschnitts	--/--	EC 4-1-2 Kap. 4.3.4.2 und Anhang E sowie D.5 für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.4 für ETK und NB
Verbundträger mit Kammerbeton	EC 4-1-2 Tab. 4.1, 4.2 und 4.3 für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.3.4.3 und Anhang F für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.4 für ETK und NB
Verbundstützen mit vollständig einbetonierten Stahlquerschnitten (Beton mittragend)	EC 4-1-2 Tab. 4.4 für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.3.5.1 für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.4 für ETK und NB
Verbundstützen mit vollständig einbetonierten Stahlquerschnitten (Beton nur isolierend)	EC 4-1-2 Tab. 4.5 für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.3.5.1 für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.4 für ETK und NB
Verbundstützen mit Kammerbeton	EC 4-1-2 Tab. 4.6 für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.3.5.2 und Anhang G für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.4 für ETK und NB
Verbundstützen aus betongefüllten Hohlprofilen	EC 4-1-2 Tab. 4.7	EC 4-1-2 Kap. 4.3.5.3 bzw. 4.3.5.4 und Anhang H für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.4 für ETK und NB
Ungeschützte Verbunddecken	--/--	EC 4-1-2 Kap. 4.3.2 und Anhang D für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.4 für ETK und NB
Geschützte Verbunddecken	--/--	EC 4-1-2 Kap. 4.3.3 und Anhang D für ETK	EC 4-1-2 Kap. 4.4 für ETK und NB
NB: Naturbrand			

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

6.5.4.5 Eurocode 5 Teil 1-2

Tabelle 6.6: Übersicht der Nachweisalternativen EC 5-1-2

Bauteil	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Anmerkung
Rechteckquerschnitte aus Nadelholz, drei- oder vierseitig beflammt	--/--	EC 5-1-2; Kap. 4.2.2 für ETK (und NB) EC 5-1-2; Kap. 4.2.3 für ETK (und NB)	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK (und NB) (Rechenwerte; Anhang B)	A
Rundquerschnitte aus Nadelholz, allseitig beflammt	--/--	EC 5-1-2; Kap. 4.2.2 für ETK (und NB) EC 5-1-2; Kap. 4.2.3 für ETK (und NB)	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK (und NB) (Rechenwerte; Anhang B)	A
Sämtliche Bauteile	--/--	EC 5-1-2; Kap. 4.2.2 für ETK (und NB)	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK und NB (Rechenwerte; Anhang B)	A
Gedämmte Holztafelbauweise	--/--	EC 5-1-2; Anhang C für ETK	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK (und NB)	
Ungedämmte Holztafelbauweise	--/--	EC 5-1-2; Anhang D für ETK	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK (und NB)	
Ungeschützte Verbindungen	EC 5-1-2; Tabelle 6.1 für ETK	EC 5-1-2; Kap. 6.2.2.1 für ETK	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK (und NB)	B
Geschützte Verbindungen	EC 2-1-2; Tabelle 6.1 für ETK	EC 5-1-2; Kap. 6.2.2.2 für ETK	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK (und NB)	B
Auf Herausziehen beanspruchte Schrauben	--/--	EC 5-1-2; Kap. 6.4 für ETK	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK (und NB)	
Bestimmung des Raumabschlusses	--/--	EC 5-1-2; Anhang E	EC 5-1-2; Kap. 4.4 für ETK (und NB)	

NB: Naturbrand

Zu A) Bei den vereinfachten Bemessungsverfahren ist am Restquerschnitt unter Berücksichtigung der temperaturbedingten Festigkeitsreduzierung der Bauteilnachweis gemäß EC 5-1-1 zu führen. Die in Tabelle 3.1 angegebenen Abbrandraten gelten nur für ETK-Beanspruchung. Die Querschnittsreduzierung im Naturbrand darf nach EC 5-1-2; Anhang A bestimmt werden. Das Nachweisziel der Naturbrandbemessung, dass das Bauteil den Brandverlauf übersteht, ist mit diesem Ansatz jedoch nicht erreichbar.

Zu B) Die Rechenregeln der Ebenen 1 und 2 gelten für symmetrische, zweischrittige Verbindungen unter ETK-Beanspruchung.

6.5.5 Beurteilung von Rechenverfahren und Prüfung der Nachweise

6.5.5.1 Allgemeines

Für die rechnerische brandschutztechnische Auslegung von Bauteilen und Tragwerken durch allgemeine Bemessungsverfahren stehen verschiedene Programme zur Verfügung, wobei die Grundlagen der Programme sowie deren Absicherung mit Ergebnissen von Brandprüfungen stark variieren. Zur systematischen Überprüfung der physikalischen, mathematischen und mechanischen Rechengrundlagen von Rechenprogrammen im Hinblick auf die thermische Analyse, Querschnittsanalyse und Systemanalyse wird im Nationalen Anhang zu EC 1-1-2 eine auf [6.48] basierende systematische Vorgehensweise vorgeschlagen. Ziel ist es, die Anwendbarkeit der Programme auf die ingenieurtechnische brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken mittels allgemeiner Bemessungsverfahren anhand einer hinreichenden Anzahl von Validierungs- und Eichbeispielen beurteilen zu können. Dabei soll auch die Anwendbarkeit der Rechenmodelle auf reale Tragwerke bewertet werden. Es werden die einzelnen Schritte der Nachweisführung nacheinander anhand eindeutiger Beurteilungskriterien validiert. Dazu wird mit Hilfe einer Prüfmatrix parameterabhängig die Rechengenauigkeit des verwendeten Programms für das betreffende Beurteilungskriterium überprüft. In der Prüfmatrix sind für das jeweilige Beispiel zum Vergleich entweder existierende analytische Lösungen oder Ergebnisse von Berechnungen anerkannter Programme aufgeführt. Damit sind die mit dem zu prüfenden Rechenprogramm erzielten Ergebnisse zu vergleichen. Die Abweichungen müssen innerhalb zulässiger Toleranzen liegen. Wenn nicht bei allen Beurteilungskriterien die Toleranzen eingehalten werden, ist auch eine eingeschränkte Eignung von Programmen möglich. Beispielsweise sind Programme, die das Systemverhalten (Auflagerbedingungen, Belastung) nicht hinreichend genau erfassen, nicht für die brandschutztechnische Bemessung von statisch unbestimmten und/oder stabilitätsgefährdeten Systemen geeignet. Die Programme können aber für die brandschutztechnische Bemessung von statisch bestimmten Biegebauteilen eingesetzt werden [6.49].

In [6.48] werden Bewertungsmaßstäbe vorgestellt, mit denen sichergestellt werden kann, dass bei Anwendung der Programme das brandschutztechnische Sicherheitsniveau in Deutschland beibehalten wird.

Die Bewertungskriterien gliedern sich in

- Programmverifikation,
- Validierung und Falsifizierung,
- testen durch Eichbeispiele.

Durch Programmverifikation kann ein mathematisch exakter Nachweis der Korrektheit des Programms geführt werden. Durch Validierung oder Falsifizierung können die allgemeinen Rechengrundlagen von Programmen mittels einer systematischen Testmethodik überprüft werden. Durch Testen der Programme anhand von Eichbeispielen, mit denen praktisch ein Brandversuch simuliert werden kann, werden alle die Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils beeinflussenden Größen berücksichtigt.

6.5.5.2 Programmverifikation

Die Rechenprogramme für brandschutztechnische Nachweise basieren auf iterativen Verfahren, mit denen Näherungslösungen ermittelt werden, da in der Regel keine geschlossene Lösung der den Problemen zu Grunde liegenden Differentialgleichungen existieren. Daher wird eine Verifikation von Programmen, die für rechnerische Brandschutznachweise eingesetzt werden, nur in Ausnahmefällen erfolgen können. Für die Ingenieurpraxis müssen Testmethoden eingesetzt werden, mit denen die Korrektheit der Programme für einen möglichst großen Anwendungsbereich mit hoher Wahrscheinlichkeit nachgewiesen werden kann.

6.5.5.3 Validierung

Durch Validierung werden bestimmte Bereiche eines Programms mit Hilfe einer systematischen Testmethodik auf Korrektheit geprüft, z. B. die Wärmeleitung in Festkörpern. Voraussetzung dafür ist das Vorliegen einer eindeutigen Lösung, die durch Handrechnung oder auf Basis von Berechnungen mit allgemein anerkannten Programmen erarbeitet werden kann. Experimentell ermittelte Ergebnisse können aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen in Versuch und Rechnung in der Regel nicht herangezogen werden. In [6.48] sind Validierungsbeispiele enthalten für

- die thermische Analyse
 - Wärmeübertragung bei Erwärmung,
 - Wärmeübertragung bei Abkühlung,
 - Wärmedurchgang bei mehreren Schichten,
- die Querschnittsanalyse
 - Thermische Dehnung / Verlängerung,
 - Temperaturabhängige Materialgesetze,
 - Grenztragfähigkeit (Maximum der σ - ε -T-Linie),
- das Systemverhalten
 - Statische Randbedingungen (Auflagerungen),
 - Theorie 2. Ordnung,
 - Ausbildung von Zwangkräften.

Mit den in [6.48] entwickelten Validierungsbeispielen steht ein Katalog zur Verfügung, mit dem die grundsätzliche Eignung von Programmen für die brandschutztechnische Tragwerksanalyse stabförmiger Bauteile anhand einzelner Teilanalysen systematisch überprüft werden kann. Im Nationalen Anhang zu Eurocode 1 Teil 1-2 wurden die Validierungsbeispiele an die aktuellen EN-Fassungen der Eurocode-Brandschutzteile angepasst und auf Verständlichkeit und Plausibilität geprüft.

6.5.5.4 Testen durch Eichbeispiele

Mit Hilfe von Eichbeispielen werden programmberchnete und experimentell ermittelte Ergebnisse hinsichtlich ihrer Übereinstimmung geprüft. Dabei muss beachtet werden, dass das Ex-

periment in der Regel nur einen Ausschnitt der „Wirklichkeit“ wiedergibt, da Versuchsergebnisse unter ganz bestimmten Voraussetzungen (Lagerungsbedingungen, Exzentrizitäten, Lastaufbringung) für Bauteile und Teiltragwerke, in den seltensten Fällen für Gesamttragwerke vorliegen. Ersatzweise können für Versuchsergebnisse auch Bemessungsergebnisse nach den Tabellen der DIN 4102 Teil 4 oder den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 und 4 verwendet werden, wenn alle Randbedingungen für die Tabellen bekannt sind. In [6.48] sind Eichbeispiele enthalten für

- schwach und stark bewehrte Stahlbetonbalken,
- Stahlbetonstützen,
- zentrisch belastete kammerbetonierte Verbundstützen.

Mit den Eichbeispielen wird die Korrektheit eines Programms durch Vergleich mit experimentellen Ergebnissen nachgewiesen, was zur Folge hat, dass die Rechenergebnisse gewissen Schwankungen unterliegen. Die zulässigen Abweichungen (Toleranzen) von vorgegebenen Lösungen müssen deutlich größer gewählt werden als bei den Validierungsbeispielen, für die im Allgemeinen eine eindeutige Lösung vorliegt.

Die vorliegenden Eichbeispiele müssen noch auf andere Bauweisen wie Stahlbau oder Holzbau erweitert werden, um alle Anwendungsbereiche allgemeiner Bemessungsverfahren abdecken zu können.

6.5.5.5 Grenzabweichungen

Bei den Validierungsbeispielen und insbesondere bei den Eichbeispielen wird es zwischen den von unterschiedlichen Programmen berechneten Lösungen Abweichungen geben. Bei der Festlegung zulässiger Grenzabweichungen (Toleranzen) von den vorgegebenen Lösungen müssen verschiedene Gesichtspunkte betrachtet werden. Schon aufgrund unterschiedlicher numerischer Methoden (FEM, Differenzenverfahren) und Gleichungslöser (Iterationsbedingungen, -schränken) können abweichende Zahlenwerte errechnet werden [6.50]. Es ist daher denkbar, dass einige Programme die Ergebnisse der Validierungs- und Eichbeispiele in einigen Fällen mit geringen Abweichungen gut und in anderen Fällen weniger gut annähern.

Die zulässigen Grenzabweichungen von Muster-Berechnungen der Validierungs- und Eichbeispiele müssen sich an der stochastischen Modellunsicherheit orientieren. Da für die Validierungsbeispiele in der Regel eindeutige Lösungen vorliegen, können nur geringe Abweichungen akzeptiert werden. Für die an experimentellen Ergebnissen orientierten Eichbeispiele muss bei der Bewertung der Programme aufgrund der größeren Modellunsicherheit auch eine größere Grenzabweichung in Kauf genommen werden.

Die zulässigen Grenzabweichungen wurden in der Beispielsammlung des Nationalen Anhangs CC zu EC 1-1-2 [6.38] bei den Validierungsbeispielen, mit denen systematische Rechengrundlagen untersucht werden, zu 1 % bis 3 % von der Referenzgröße und bei den Eichbeispielen zu 5 % bis 10 % festgelegt.

6.5.5.6 Beispielsammlung im Nationalen Anhang

Im Nationalen Anhang CC zu Eurocode 1 Teil 1-2 sind Validierungs- und Eichbeispiele zusammengestellt worden, mit denen die Anwendbarkeit der Programme für eine ingenieurtechnische brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken überprüft werden kann und damit auch die Eignung der Rechenprogramme auf reale Tragwerke bewertet werden kann. Die Beispielsammlung besteht zunächst aus elf Beispielen, mit denen zum einen die wesentlichen Rechengrundlagen der Erwärmung sowie des temperaturabhängigen Trag- und Verformungsverhaltens in Validierungsbeispielen und zum anderen die gesamte Berechnung mit Testbeispielen durch Nachrechnen eines Brandversuches überprüft werden können.

Mit den Validierungsbeispielen werden die einzelnen Schritte der Nachweisführung nacheinander anhand eindeutiger Beurteilungskriterien validiert. Dazu wird mit Hilfe einer Prüfmatrix parameterabhängig die Rechengenauigkeit des verwendeten Programms für das betreffende Beurteilungskriterium überprüft. In der Prüfmatrix sind für das jeweilige Beispiel zum Vergleich entweder existierende analytische Lösungen oder Ergebnisse von Berechnungen anerkannter Programme aufgeführt. Damit sind die mit dem zu prüfenden Rechenprogramm erzielten Ergebnisse zu vergleichen. Die Abweichungen sollen innerhalb zulässiger Toleranzen liegen.

Mit den Eichbeispielen kann der „gesamte Rechengang“ wie bei der Simulation eines Brandversuches nachgerechnet werden. Zurzeit sind in der Beispielsammlung des Nationalen Anhangs CC lediglich drei Eichbeispiele für Stahlbetonbauteile sowie eines für einen Stahl-Verbundträger enthalten, hier sind künftig Ergänzungen für weitere Bauweisen sowie gegebenenfalls Teiltragwerke erforderlich.

Die Beispielsammlung wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens [6.48] erarbeitet und an die aktuellen Fassungen der Eurocode-Brandschutzteile angepasst. Die Beispielsammlung kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, d. h. eine Garantie, dass ein Programm fehlerfrei arbeitet, kann auch bei erfolgreichem Durchlauf sämtlicher Beispiele nicht abgeleitet werden. Die Validierung eines Programms anhand der Beispielsammlung gewährleistet jedoch einen Mindeststandard.

Die Beispielsammlung kann wie oben beschrieben künftig erweitert werden. In letzter Konsequenz verbleibt die Verantwortung für die Richtigkeit des Programms jedoch beim Hersteller und für die Anwendung des Programms beim Anwender, der die Plausibilität der erzielten Ergebnisse zu überprüfen hat.

Der Nationale Anhang CC zu EC 1-1-2 sieht vor, dass vom Ersteller eines Rechenprogramms zur Durchführung von Nachweisen nach den allgemeinen Bemessungsverfahren vor der Anwendung des Programms für bauordnungsrechtlich relevante Brandschutznachweise die Validierungsbeispiele eigenständig berechnet werden sollen. Dabei sollen die Eingangsdaten und Rechenannahmen entsprechend der Programmbeschreibung unverändert verwendet werden. Unter Verwendung der im Nationalen Anhang zu EC 1-1-2 enthaltenen tabellarischen Übersichten sollte über die im Rahmen der Validierung durch den Programmierer erzielten Ergebnisse eine Dokumentation erstellt werden. Die Abweichungen von den Muster-Ergebnissen sollen innerhalb der angegebenen Grenzabweichungen liegen.

6.5.5.7 Ringberechnung

Die brandschutztechnische Bemessung von tragenden Bauteilen findet in der Praxis zunehmend unter Anwendung der allgemeinen Bemessungsverfahren statt. Die Bemessung bzw. Simulation brandbeanspruchter Bauteile oder Tragwerke ist in der Regel kosteneffektiver als realmaßstäbliche Brandversuche. Im Rahmen einer Ringberechnung wurden durch verschiedene Anwender Vergleichsrechnungen an einer brandbeanspruchten Stahl- und einer Stahlbetonstütze mit unterschiedlichen Softwareprogrammen und/oder verschiedenen Anwendern durchgeführt. Ringberechnungen dienen dazu, die Streuung der Ergebnisse innerhalb einer konkreten Fragestellung aufgrund der Einflüsse unterschiedlicher Parametervoreinstellungen der Programme und unterschiedlicher Nutzer zu bewerten.

Die vorgestellte Ringberechnung fußt auf zwei realmaßstäblichen Brandversuchen, die im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU-Braunschweig durchgeführt wurden. Eine detaillierte Versuchsbeschreibung sowie Auswertung der Simulationen ist in Anhang A6.1 enthalten.

Im ersten Brandversuch wurde eine ungeschützte Stahlstütze HEB 300 der Stahlsorte S355 untersucht. Die Länge der im Brandversuch untersuchten, beidseitig gelenkig gelagerten Stütze betrug 3,64 m. Dies beinhaltete eine angeschweißte Kopf- bzw. Fußplatte (40x40x4 cm³), die prüfobenbedingt erforderlich war. Die Stütze wurde mit 1.530 kN belastet und anschließend einer vierseitigen Brandbeanspruchung gemäß ETK ausgesetzt. Die mechanische Belastung wurde mit einer Exzentrizität von 3 cm aufgebracht. Während der Versuchsdurchführung wurde die horizontale Verformung in Stützenmitte gemessen. Zusätzlich wurden die Oberflächentemperaturen des Steges und an einem Flansch gemessen.

Die numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die berechneten Temperaturen in 4 von 5 Simulationen sehr gut mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen. Der berechnete Versagenszeitpunkt liegt in allen Simulationen vor dem tatsächlichen Versagenszeitpunkt im Versuch.

Im zweiten Brandversuch wurde eine Stahlbetonstütze 200 mm x 200 mm der Betonfestigkeitsklasse C 20/25 untersucht. Im Rahmen der Ringberechnung wurde auch der Einfluss unterschiedlicher Vorverformungen untersucht. Für zentrisch belastete Stützen wurde in [6.51] festgestellt, dass bei Annahme einer parabelförmigen Vorverformung über die Stützenlänge mit einem Stich von $L/2000$ eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Rechenergebnissen nach dem allgemeinen Bemessungsverfahren erzielt wird, nach EC 2-1-1 ist eine Vorverformung von $L/400$ erforderlich [6.52]. Im Zuge der Ringberechnung war die Vorverformung ($L/1000$, $L/1500$, $L/2000$) der variierende Parameter.

Hinsichtlich der thermischen Analysen stimmen die berechneten Temperaturen im Querschnittszentrum der Stahlbetonstütze sowie in der Stabachse der Längsbewehrung gut mit den Versuchsergebnissen überein.

Aufgrund der im Rahmen der Modellbildung unterschiedlich gewählten Lagerungsbedingungen und der im Brandofen ausgeführten Lagerung wurden in den Simulationen sowohl frühere als auch spätere Versagenszeitpunkt als im Versuch berechnet. Anhand der numerischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei identischen Randbedingungen inklusive gleichem Anwender sowie verwendeter Software, der Einfluss der Vorverformung in Hinblick auf den berechneten Versagenszeitpunkt gering ist.

6.6 Betonabplatzungen

Bei schneller Erwärmung und hoher Temperaturbeanspruchung kann es bei Beton zu Abplatzungen kommen, die erhebliche Schäden an den Betonbauteilen verursachen können. Abplatzungen werden unterteilt in explosionsartige Abplatzungen, in Zuschlagstoffabplatzungen und in das Abfallen von Betonschichten. Das Abfallen von Betonschichten tritt infolge der Zermürbung des Betons nach längerer Brandbeanspruchung auf. Bei den Zuschlagstoffabplatzungen handelt es sich um Abplatzungen von einzelnen Zuschlagkörnern, die auf Grund des mineralogischen Aufbaus des Zuschlags auftreten. Die explosionsartigen Abplatzungen treten zu Beginn eines Brandes auf. Eine wesentliche Ursache hierfür ist der Feuchtigkeitsgehalt des Betons. Es entstehen Spannungen infolge des Massentransports in Form von Wasser, Wasserdampf und Luft durch das Porensystem des Betons während der Erwärmung. Zusätzlich entstehen Eigenspannungen im Querschnitt, die durch das unterschiedliche Ausdehnungsverhalten der Betonkomponenten und durch die nichtlineare Temperaturverteilung im Betonquerschnitt hervorgerufen werden. Mehrere Faktoren haben Einfluss auf die entstehenden Eigenspannungen, wie der Temperaturanstieg zu Beginn eines Brandes, die äußeren Lasten, die Geometrie, die Zuschlagsart, der Feuchtigkeitsgehalt, die Permeabilität sowie die Betonfestigkeit.

Die explosionsartigen Abplatzungen können den Betonquerschnitt soweit schädigen, dass die Tragfähigkeit gefährdet wird. Dabei gilt als Faustformel: Je dichter der Beton, umso größer die Gefahr von explosionsartigen Abplatzungen. Da aber viele Faktoren Einfluss auf die Abplatzungen haben, werden nachfolgend die Maßnahmen entsprechend EC 2-1-2 sowie entsprechend einer Veröffentlichung für Tunnelbrände [6.53] vorgestellt.

Bei einer Bemessung mit Hilfe der Tabellen nach EC 2-1-2 ist der Effekt der Abplatzungen für Betone der Festigkeitsklasse bis einschließlich C50/60 bereits berücksichtigt und es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich. Bei Anwendung vereinfachter und erweiterter Bemessungsverfahren sind Abplatzungen gesondert zu betrachten, sofern die Mindestquerschnittsabmessungen der Bemessungstabellen nicht eingehalten werden.

Für hochfesten Beton bis zur Festigkeitsklasse C100/115 sind geeignete Maßnahmen zu wählen, wie die Erhöhung der tabellierten Mindestquerschnittsabmessungen. Die Werte hierfür sind in EC 2-1-2 Kap. 6.4.3 angegeben. Um die Abplatzungen zu beschränken, können zusätzlich Polypropylenfasern verwendet werden. Für Betone und Bauteile, die nicht darüber erfasst werden können, sind experimentelle Nachweise erforderlich. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Abplatzungen ist das Anbringen einer brandschutztechnischen Bekleidung.

Im third draft des EC 2-1-2 [6.26] werden die Bemessungsregeln bzgl. Abplatzen verschärft. Brandversuche haben gezeigt, dass ETK-beanspruchte Bauteile mit einer Betonfestigkeit < 70 MPa in der Regel wenig bis gar nicht abplatzen, ab einer Festigkeit von 70 MPa jedoch verstärkt mit Abplatzungen zu rechnen ist. Für Bauteile mit einer Betonfestigkeit von mind. 70 MPa wird daher entweder ein experimenteller Nachweis verlangt, dass keine wesentlichen Abplatzungen auftreten oder der Beton ist mit 2 kg/m^3 Polypropylenfasern zu versetzen.

6.7 Besondere Bauweisen

6.7.1 Hochfester und ultra-hochfester Beton

Bauteile aus hochfestem Beton können nach EC 2-1-2 [6.2] in Anlehnung an die Verfahren für Normalbeton bemessen werden. Unter bestimmten Bedingungen können auch die tabellarischen Daten für die Bemessung von Bauteilen aus hochfestem Beton angewendet werden.

Im Kapitel 6 des EC 2-1-2 sind Angaben über die mechanischen Eigenschaften von hochfestem Beton angegeben, mit denen die Bemessung durchgeführt werden kann. Die thermischen Eigenschaften können entsprechend dem Normalbeton angesetzt werden.

In Bild 6.22 sind die Festigkeitsreduzierungen für hochfesten Beton entsprechend EC 2-1-2 dargestellt. Dabei werden drei Klassen unterschieden, die sich nach der Festigkeit des hochfesten Betons richten. Die Klasse 1 umfasst den Beton C 55/67 und C 60/75, die Klasse 2 umfasst C 70/85 und C 80/95 sowie die Klasse 3 den C 90/105. Bei Betonen mit höherer Festigkeit als Klasse 3 müssen die Materialkennwerte experimentell ermittelt werden.

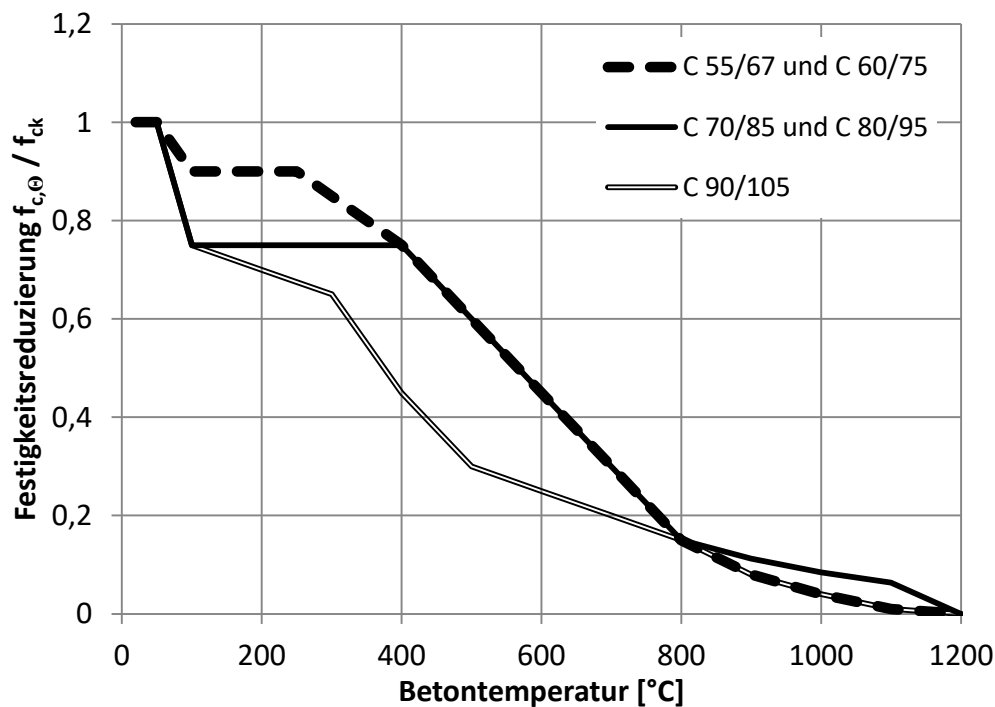


Bild 6.22 Festigkeitsreduzierung $f_{c,\theta} / f_{ck}$ von hochfestem Beton

Mit Hilfe der Festigkeitsreduzierung und den Werten für die Parameter der Spannungs-Dehnungsbeziehungen für Normalbeton bei erhöhten Temperaturen lassen sich für die verschiedenen Klassen die Spannungs-Dehnungslinien ermitteln. Bild 6.23 zeigt als Beispiel die Spannungs-Dehnungslinien für Beton mit der Festigkeitsklasse C 70/85 und C 80/95 (Klasse 2).

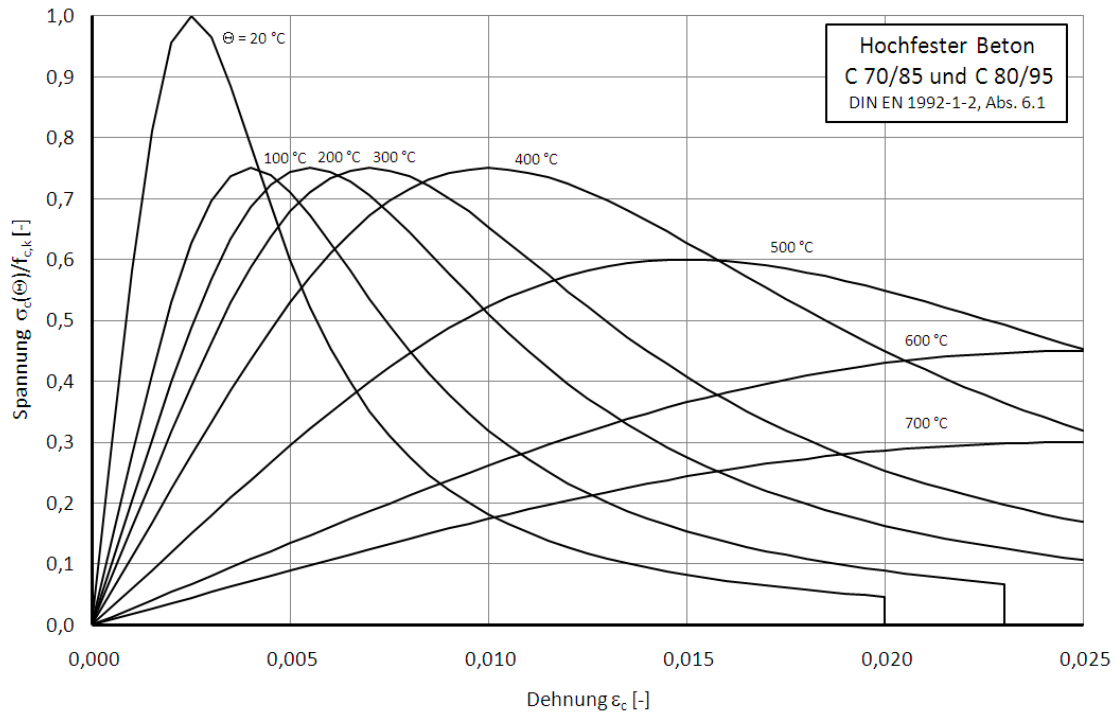


Bild 6.23 Spannungs-Dehnungslinien von hochfestem Beton, hier Klasse 2

Weiterhin müssen explosionsartige Betonabplatzungen berücksichtigt werden, die bei hochfestem Beton auf Grund der größeren Packungsdichte wesentlich gravierender ausfallen können als bei Normalbeton. Bei Betonklassen C55/67 bis C80/95 mit einem Silicatstaubgehalt von weniger als 6 % des Zementgewichts gelten dieselben Vorschriften wie für Normalbeton. Für höhere Silicatstaubgehalte bzw. höhere Betonklassen werden in EC 2-1-2 verschiedene Methoden (A bis D) zur Vermeidung von explosionsartigen Betonabplatzungen angegeben.

In neueren Forschungsarbeiten werden auch Betone mit Festigkeitsklassen höher als C100/115 (ultrahochfeste Betone (UHPC)) betrachtet [6.54]. An der TU Braunschweig wurden temperaturabhängige thermische Materialkennwerte und Spannungs-Dehnungslinien für ultrahochfeste Betone in Anlehnung an eine Brandbeanspruchung gemäß ETK entwickelt. Besonderes Augenmerk lag hier auf dem Abplatzverhalten, da aufgrund der hohen Packungsdichte durch die explosionsartigen Abplatzungen zu Beginn eines Brandes erhebliche Schäden entstehen können, die die Tragfähigkeit gefährden. Zur Reduzierung des Abplatzvermögens wurden im Rahmen der Untersuchungen der UHPC-Rezeptur unterschiedliche Mengen Polypropylenfasern beigemischt. Bezüglich des Abplatzverhaltens von UHPC konnte in [6.54] nachgewiesen werden, dass durch Zugabe von PP-Fasern mit einem Anteil ab 2 kg/m^3 die Abplatzungen auf ein vernachlässigbares Maß begrenzt werden können. Die Ausgangsstoffe der Betonrezeptur wurden stetig weiterentwickelt, so dass noch höhere Betondruckfestigkeiten mit einem noch dichteren Gefüge erzielt werden können. Damit einhergehend sind ggf. die PP-Faseranteile zu erhöhen. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu berücksichtigen, dass ein zu hoher PP-Fasergehalt Festigkeitsreduzierungen hervorrufen kann. Zurzeit liegen noch keine Bemessungshilfen für UHPC im Rahmen des Eurocodes 2 Teil 1-2 vor, sodass die Anwendung nur über eine Zustimmung im Einzelfall erfolgen kann.

6.7.2 Selbstverdichtender Beton

Selbstverdichtender Beton ist dadurch gekennzeichnet, dass die Verdichtungsarbeit des Betons nach dem Einbringen in die Schalung entfällt. Hierzu zählen das Entlüften sowie das Ausfüllen der Bewehrungszwischenräume. Aus rheologischen Gründen muss der Feinanteil der Gesteinskörnung bei selbstverdichtendem Beton erhöht werden, wodurch die Permeabilität verringert wird. Analog zu den hochfesten und ultra-hochfesten Betonen steigt damit einhergehend das Abplatzvermögen, weshalb entsprechende Maßnahmen (z. B. PP-Fasern) ergriffen werden müssen. In [6.55] wurde im Rahmen einer Versuchsreihe an selbstverdichtenden Betonproben festgestellt, dass bei wassergelagerten Betonen ein PP-Gehalt von $1,5 \text{ kg/m}^3$ zu gering ist, um explosive Abplatzungen zu verhindern. Bei luftgelagerten Betonproben stellte sich dieser Gehalt jedoch als ausreichend heraus.

Selbstverdichtender Beton weist besondere Frischbetoneigenschaften auf. Zur Sicherstellung der Eigenschaften wurden vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton entsprechende Vorgaben in einer Richtlinie [6.56] festgelegt, welche bauaufsichtlich eingeführt worden ist. Hinsichtlich der Festbetoneigenschaften unterscheidet sich selbstverdichtender Beton demnach nicht von Normalbeton, daher wird dieser in den Brandschutzteilen der Eurocodes [6.2][6.4] nicht gesondert behandelt.

6.7.3 Leichtbeton

Die in Eurocode 2-1-2 [6.2] enthaltenen Bemessungsverfahren für Normalbeton gelten auch für Leichtbeton bis zur Festigkeitsklasse LC55/60. Temperaturabhängige Materialkennwerte von Leichtbeton sind hier jedoch nicht enthalten. In Eurocode 4-1-2 [6.4] werden hingegen thermische und thermo-mechanische Materialeigenschaften von Leichtbeton mit Rohdichten zwischen 1.600 und 2.000 kg/m^3 bereitgestellt, welche von den in [6.2] für Normalbeton enthaltenen Materialkennwerten abweichen. Bei vergleichender Betrachtung mit Normalbeton ist beispielsweise für Leichtbeton eine Reduzierung der Druckfestigkeit erst ab einer Temperatur von 400 °C (Normalbeton bei 300 °C) vorzunehmen, für höhere Temperaturen nimmt die Festigkeit von Leichtbeton schneller ab. Ferner verläuft die temperaturabhängige thermische Leitfähigkeit unterhalb der in Eurocode 2-1-2 [6.2] enthaltenen unteren Grenzfunktion (vgl. Abschnitt 6.4.1.2).

6.7.4 Carbonbeton bzw. textilbeton Carbonbeton

Bei Carbonbeton besteht die Bewehrung aus Kohlenstofffasern, Lamellen oder textilen Gelegestrukturen. Infolge einer niedrigen Glasübergangstemperatur von Klebern, Tränkungsmaterialien (50 °C bis 100 °C) erfolgt ein frühzeitiger verstärkter Abfall der Festigkeitseigenschaften, weshalb der Anwendungsbereich für geklebte CFK-Lamellen unter der Glasübergangstemperatur des Klebers und der Lamelle liegt. Brandschutztechnisch vorteilhafter sind textile Gelege (Fasern), die in den Beton eingelegt werden. In [6.57] wird von Untersuchungen berichtet, die zeigen, dass Carbonfasern bei ca. 550 °C oxidieren und bei ca. 760 °C vollständig thermisch zersetzt sind. In [6.57] wurde die Zugfestigkeit von Carbonbetonprobekörpern unterschiedlicher Materialkombinationen untersucht und diese mit weiteren Literaturangaben verglichen. Es wird festgestellt, dass die Zugfestigkeit von Carbonbeton bei 200 °C auf ca. 80% der Aus-

gangsfestigkeit absinkt, bei 300°C noch ca. 60% und bei 500°C noch ca. 20% der Ausgangsfestigkeit vorhanden sind. Für Carbonbetonbauteile sind daher höhere Betondeckungen oder zusätzliche Brandschutzmaßnahmen wie Bekleidungen erforderlich.

6.7.5 Hochfester Bewehrungsstahl

Hochfeste Bewehrungsstähle (z. B. SAS 670/800) kommen zunehmend zum Einsatz. Über das Hochtemperaturverhalten ist jedoch noch wenig bekannt. In Versuchen wurde festgestellt [6.58], dass das Hochtemperaturverhalten dem des B 500 mit veränderter Festigkeit entspricht. Da die Versuche jedoch als Bauteilversuche durchgeführt wurden, sind keine verlässlichen Angaben über das Materialverhalten vorhanden. Werden hochfeste Bewehrungsstähle eingesetzt, müssen zunächst die thermischen Materialkennwerte durch Versuche ermittelt werden. Mit den Kennwerten kann dann entsprechend des EC 2-1-2 die Bemessung durchgeführt werden.

6.7.6 Hochfester Baustahl

Für den Stahlbau werden Stahlgüten mit höheren Festigkeiten entwickelt. Zu nennen sind hier der normalisierte Feinkornbaustahl S460N sowie der thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustahl S460M. In [6.59] wurden die mechanischen Kennwerte von zwei Stahlsorten S 460 M und S 460 N und mit denen aus der DIN EN 1993-1-2 verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass der thermomechanisch gewalzte Stahl S460M durch die Materialkennwerte abgedeckt ist, der Stahl S460 N sich jedoch ungünstiger verhält.

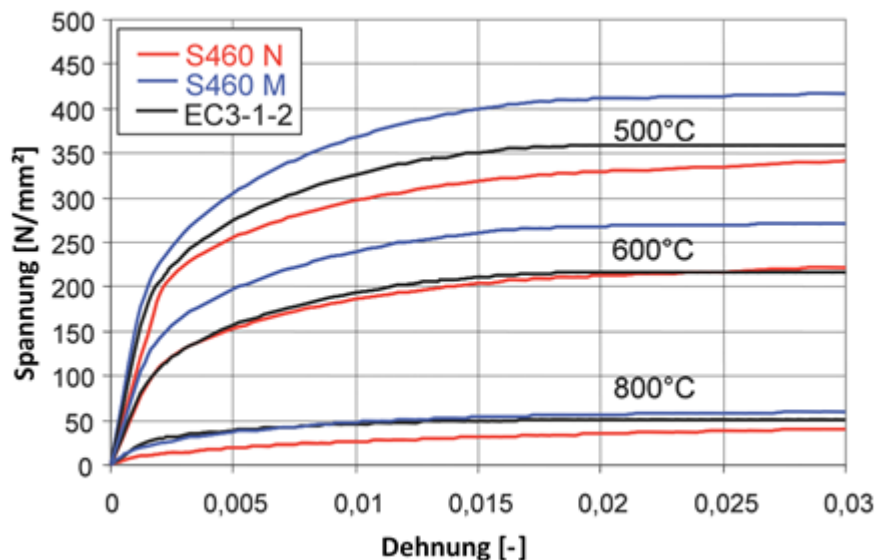


Bild 6.24 Vergleich der Spannungsdehnungsbeziehungen von S460N, S460 M sowie den Materialgesetzen gemäß EC 3-1-2, entnommen aus [6.59]

Bei der brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen aus Stahl S460 N sollten daher die temperaturabhängigen Abminderungen der Streckgrenze gemäß Bild 6.25 vorgenommen werden.

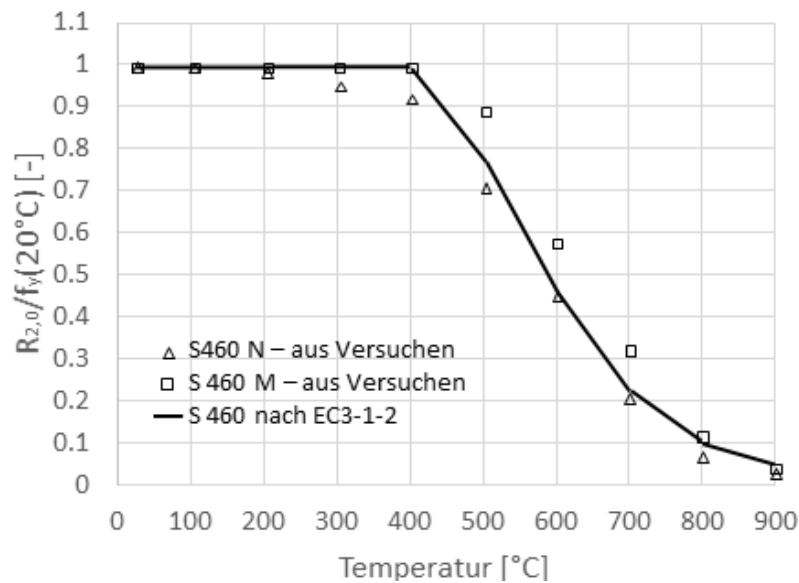


Bild 6.25 Abminderung der Streckgrenze $R_{2,0}$ aus Versuchen und nach Eurocode [6.59]

6.7.7 Verzinkter Stahl

Feuerverzinkte Stahlbauteile weisen im Vergleich zu blankem Baustahl ein günstigeres Erwärmungsverhalten auf. Dieses ist auf unterschiedliche Oberflächeneigenschaften, ausgedrückt durch den Emissionsgrad, zurückzuführen. In [6.60] wurde ein zweistufiges Emissionsgradkonzept entwickelt, welches zukünftig auch in den Eurocodes DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1994-1-2 enthalten sein wird, vgl. Tabelle 6.7. Tabelle 6.7 Emissivität ϵ_m in Abhängigkeit der Temperatur der Stahloberfläche

Oberflächentemperatur	$T \leq 500^\circ\text{C}$	$T \geq 500^\circ\text{C}$
Baustahl	0,70	
Feuerverzinkter Baustahl ¹	0,35	0,70

Feuerverzinkter Baustahl gemäß DIN EN ISO 1461 und einer Stahlzusammensetzung gemäß Kategorie A und B nach DIN EN ISO 14713-2

Das Potential der Verzinkung wird in Bild 6.26 anhand des Ausnutzungsgrads μ_0 zum Zeitpunkt $t = 0$ eines Biegebauteiles aufgezeigt, welches eine Feuerwiderstandsklasse von 30 Minuten aufweist. Demnach führt die Verzinkung bei massigen Bauteilen nahezu zu einer Verdopplung der aufnehmbaren Lasteinwirkungen. Unterstellt man für übliche Hochbauten vereinfacht $\mu_{fi} = 0,65$, so müssen hier in der Kaltbemessung nur geringfügige Reserven bereitgestellt werden und der Nachweis der Feuerwiderstandsklasse R 30 gelingt ohne passive Brandschutzmaßnahmen. Es ist jedoch auch festzustellen, dass Profile mit geringerer Massigkeit in der Kaltbemessung trotz Verzinkung nur sehr geringe Ausnutzungsgrade aufweisen dürfen, um ohne Schutzmaßnahmen den Nachweis der Feuerwiderstandsklasse R 30 erfüllen zu können.

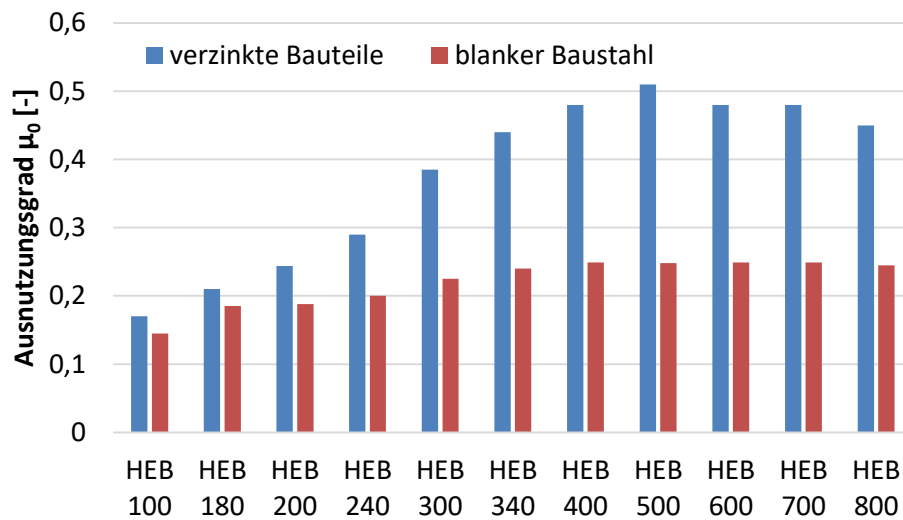


Bild 6.26 Vergleich der Ausnutzungsgrade μ_0 für verzinkte und unverzinkte Bauteile für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten auf Grundlage von [6.60]

6.7.8 Verbundstützen mit Einstellprofilen

Durch eine geschickte Anordnung der Materialien Baustahl und Beton im Querschnitt können konkurrierenden Ansprüche an die Tragfähigkeit, den Feuerwiderstand und die Schlankheit durch Verbundstützen mit Einstellprofilen erfüllt werden. Infolge der vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit und hohen Wärmespeicherkapazität des Betons wird im Brandfall die Erwärmung des innenliegenden Stahlprofils signifikant verzögert. Ferner bildet der Beton in Kombination mit benachbarten Stahlelementen einen Verbundquerschnitt und trägt somit zu einer besonders wirtschaftlichen Bauweise bei. Um zudem einen schnellen Bauablauf und eine optisch ansprechende Oberfläche zu gewährleisten, wird als äußeres Element der Stützen ein Stahlhohlprofil angeordnet.

In der Praxis werden unterschiedliche Profile als Einstellprofil eingesetzt, um gezielt bestimmte Eigenschaften, wie die Biegesteifigkeit, zu erhöhen. Im Inneren von ausbetonierten Hohlprofilstützen können dazu sowohl übliche Walz- oder Schweißprofile als auch Blechpakete oder massive Stahlkerne angeordnet werden. Verbundstützen mit Einstellprofil können über die Abmessungen der einzelnen Querschnittskomponenten individuell hinsichtlich der geforderten Tragfähigkeit und Feuerwiderstandsdauer gestaltet werden. Je nach gewähltem Einstellprofil und Dicke der Betondeckung können sie in der Regel ohne zusätzliche brandschutztechnische Maßnahmen Feuerwiderstandsdauern von 90 oder 120 Minuten erreichen, wobei der Beton gezielt zum thermischen Schutz des Stahlprofils eingesetzt und dimensioniert wird.

EC 4-1-2 ermöglicht generell die Bemessung von ausbetonierten Hohlprofilstützen mit Einstellprofilen, es werden jedoch keine ganzheitlich anwendbaren Bemessungsverfahren für die Verbundstützen mit Einstellprofilen zur Verfügung gestellt.

In [6.61] wird ein vereinfachtes Bemessungsverfahren für ausbetonierte Hohlprofilstützen mit eingestellten Doppel-T-Profilen vorgestellt. Das Verfahren enthält eine vereinfachte Temperaturermittlung sowie eine Traglastermittlung auf Grundlage reduzierter Festigkeits- und Steifigkeitswerte mittels des Ersatzstabverfahrens. In [6.62] wird ein Bemessungsverfahren für ausbetonierte Hohlprofilstützen mit massivem Stahlkern vorgestellt. Darin werden die Stützen aus

„thermisch geschützte Stahlkernstützen“ auf Grundlage von EC 3-1-2 bemessen. Zur Ermittlung der Stahlkerntemperatur werden analytische Zusammenhänge angegeben, die die Querschnittsgeometrie und die Feuerwiderstandsdauer beinhalten.

Ansätze für die Bemessung von ausbetonierten Hohlprofilstützen mit eingestelltem zweitem Hohlprofil (sogenannte „double-tube“- bzw. „double-skin“-Stützen) wurden in [6.63] entwickelt.

6.7.9 Holz-Beton-Verbunddecken

Holz-Beton-Verbunddecken (HBV) gewinnen im Bauwesen immer mehr an Bedeutung. Als HBV-Decke werden Deckensysteme bezeichnet, bei denen lineare oder flächige Holzbauteile mit einer in der Regel monolithischen Betonplatte über ein spezielles metallisches oder formschlüssiges Verbundmittel schubfest zu einem Verbundquerschnitt miteinander verbunden werden. Zur Herstellung der Verbundtragfähigkeit werden dazu spezielle Verbundmittel im Holz vorgesehen, die die anschließend meist örtlich aufgebraute Betonschicht und das Holz kraftschlüssig miteinander verbinden. In den letzten Jahrzehnten wird sie insbesondere im mehrgeschossigen Holzbaus als erfolgreiches System zur Abdeckung großer Spannweiten vermehrt eingesetzt. Im Hinblick auf nachhaltige und ressourcenschonende Bauweisen stellt die Minimierung des Verbrauchs von Stahl und Beton an Massivdecken durch Ersatz der Zugzone mit Holz eine ökologische, als auch statisch effiziente Alternative zur reinen Massivbauweise dar. Im Brandfall schützt das Holz auf feuerzugewandter Seite sowohl die Betonschicht, als auch den Restquerschnitt des Holzes durch Abbrand in Form einer isolierenden Kohleschicht. Diese reduziert die Temperatureinwirkung auf den übrigen Verbundquerschnitt, als auch die Verbundfuge. Der Temperaturanfälligkeit der Verbundmittel kann durch eine entsprechende umlaufende Holzüberdeckung entgegengewirkt werden. Die monolithisch aufgebraute Betonschicht sichert die Rauchdichtigkeit der Decken zuverlässig.

Zur Bemessung der HBV s. Kap. 6.5.2.5.

6.8 Nachweise nach DIN 4102 Teil 4

Mit Beschluss der ARGEBAU, die Eurocodes für die Bemessung bei Normaltemperatur und für den Brandfall im Jahr 2012 verbindlich einzuführen, entstand der Bedarf aus der DIN 4102-4 [6.64] die bereits im Eurocode geregelten Nachweise als entgegenstehende Regelungen zu entfernen. Der Erhalt der DIN 4102-4 als „Restnorm“ ist jedoch erforderlich für brandschutztechnische Bemessungsregeln, die nicht in den Eurocodes enthalten sind, wie Sonderbauteile und historische Bauweisen, damit keine „Nachweislücke“ entsteht [6.65]. Die Feuerwiderstandsklassen werden im Gegensatz zu den Eurocodes weiterhin mit der nationalen Kurzbezeichnung F angegeben, da die zugrundeliegenden Brandversuche auf Basis nationaler Prüfnormen durchgeführt wurden.

Alle Ausbaukonstruktionen – Trockenbau, Unterdecken, etc. – bleiben in der DIN 4102-4 erhalten und werden durch neuere Prüfergebnisse ergänzt. Die Nachweise der DIN 4102-4, die in den Eurocodes enthalten sind wie die Bemessungstabellen für Stahlbetonbauteile fallen aus der DIN 4102-4 heraus. Alle bisherigen Nachweise der DIN 4102-4, die nicht in den Eurocodes geregelt sind, verbleiben in der DIN 4102-4.

Tabelle 6.8 zeigt die Gliederung von DIN 4102-4 [6.64]. Im Abschnitt klassifizierte Betonbauteile werden die Bauteile aus Stahlbeton- und Spannbetonplatten und aus Spannbetonhohl- dielen, Stahlbeton- und Spannbetondecken und -dächer aus Fertigteilen, Stahlbeton- und Spannbeton-Rippendecken, Stahlbeton- und Spannbeton-Plattenbalkendecken sowie Ziegel- decken nach DIN 1045-100 behandelt. Weiter geht es mit Stahlbeton- und Spannbeton-Bal- kendecken sowie entsprechenden Rippendecken mit Zwischenbauteilen. Die Feuerwider- standsklassen von Stahlbetondecken in Verbindung mit im Beton eingebetteten Stahlträgern sowie Kappendecken bleiben ebenso erhalten wie die Stahlbetondächer und Stahlbetonstüt- zen sowie Stahlbeton- und Spannbeton-Zugglieder. Neu werden klassifizierte Stahlbeton- wände aufgenommen. Das Kapitel schließt mit Hinweisen zum hochfesten Beton und zum Leichtbeton mit geschlossenem und haufwerksporigem Gefüge.

Tabelle 6.8 Gliederung des Inhaltes von DIN 4102-4

Abschnitt	Bauprodukte	Inhalt
	-	Vorwort
	-	Einleitung
1	-	Anwendungsbereich, Grundlagen
2	-	Normative Verweise
3	-	Begriffe
4	Baustoffe	Baustoffe
5		Beton, Leichtbeton
6		Porenbeton
7	Bauteile	Stahl
8		Holz
9		Mauerwerk
10	Ausbau	Trockenbau
11	Sonderbau	Sonderbauteile
		Literatur

Der Abschnitt Klassifizierte Bauteile aus bewehrtem Porenbeton umfasst Decken- und Dach- platten sowie tragende und nichttragende Wände aus bewehrten Porenbetonplatten.

Der Abschnitt Klassifizierte Stahlbauteile enthält Konstruktionsgrundsätze sowie Feuerwider- standsklassen von bekleideten Stahlträgern und –stützen sowie Feuerwiderstandsklassen von Stahl-Zuggliedern. Ansonsten entfallen die Nachweise für tragende Stahlbauteile, die in Euro- code 3 Teil 1-2 abgedeckt sind.

Der Abschnitt Klassifizierte Holzbauteile umfasst Grundlagen zur Bemessung von Holzbautei- len sowie Feuerwiderstandsklassen von Decken in Holztafelbauart, Holzbalkendecken, Dä- chern aus Holz und Holzwerkstoffen, speziellen Holzbauteilen und Verbindungen. Es folgen klassifizierte Wände aus Holzkonstruktionen, d. h. 2-schalige Wände aus Holzwolle-Leicht- bauplatten, Fachwerkwände, Wände in Holztafelbauweise und Wände aus Vollholz-Blockbal- ken. Ergänzend zu den Regelungen in der Hauptnorm wird derzeit eine Änderung A1 zu DIN 4102-4 erarbeitet, in der weitere Nachweise für Holzbaukonstruktionen geregelt sein werden.

Der Abschnitt Klassifizierte Wände aus Mauerwerk umfasst tragende und nichttragende Wände aus Mauerwerk.

Im Abschnitt Trockenbau werden alle klassifizierten Wand- und Unterdeckenkonstruktionen zusammengefasst. Hierzu werden einige Ausführungsdetails ergänzt, die in der Praxis benötigt und nachgefragt werden. Außerdem werden einige neuere Prüfergebnisse berücksichtigt. Weitere klassifizierte Trockenbaukonstruktionen werden zukünftig über das Änderungspapier A1 zur DIN 4102-4 geregelt sein.

Im Abschnitt Sonderbauteile werden die nichttragenden Außenwände, Lüftungsleitungen, Installationsschächte und –kanäle zusammengefasst. Der Teil zu Bedachungen wurde aufgrund neuerer Erkenntnisse wesentlich erweitert.

6.9 Industriebau

Industriebauten zählen nach den Bauordnungen der Länder zu den baulichen Anlagen und Räumen besonderer Art oder Nutzung. Durch Anwendung von Abschnitt 7 der Muster-Industriebaurichtlinie besteht in Verbindung mit der DIN 18230 Teil 1 [6.66] unter Nutzung des Verfahrens mit äquivalenter Branddauer ein einheitliches Verfahren zur brandschutztechnischen Beurteilung von Industriebauten unter Berücksichtigung der spezifischen Belange und Erfordernisse einer industriellen Nutzung. Die Anwendung der Eurocode-Brandschutznachweise im Industriebau ist gemäß MVV TB formal zwar ausgenommen, wäre aus wissenschaftlicher Sicht aber möglich.

DIN 18230-1 dient der Ermittlung der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer der Bauteile von Brandbekämpfungsabschnitten im Industriebau. Bei der brandschutztechnischen Beurteilung werden die Randbedingungen wie Gebäudeabmessungen, Brandlasten, Öffnungsflächen, Umfassungsbauteile und Anlagentechnik berücksichtigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei einem Brand ein Versagen der Einzelbauteile mit ausreichender Wahrscheinlichkeit nicht eintritt oder nicht zum Einsturz der tragenden Konstruktion (Tragwerk, Gesamtkonstruktion) führt und ein Löschangriff auch innerhalb des Gebäudes über einen angemessenen Zeitraum vorgetragen werden kann. Durch Umrechnung der Brandlast unter Berücksichtigung des Wärmeabzuges über Öffnungsflächen und Umfassungsbauteile in eine äquivalente Branddauer wird die Brandbeanspruchung eines Bauteils beim natürlichen Schadenfeuer auf diejenige bei einem Normbrand zurückgeführt. Unter Berücksichtigung von Bewertungs- und Sicherheitsfaktoren wird aus den Brandwirkungen die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer t_f der Bauteile berechnet und anschließend den Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102 bzw. DIN EN 13501-2 [6.19] zugeordnet.

Im Rechenverfahren der DIN 18230-1 werden die zulässige Fläche und die Anforderungen an die Bauteile nach Sicherheitsklassen für einen Brandabschnitt bestimmt. Dafür wird die äquivalente Branddauer $t_{\bar{a}}$ nach Gleichung (6.17) ermittelt.

$$t_{\bar{a}} = q_R \cdot c \cdot w \quad (6.17)$$

mit

q_R rechnerische Brandbelastung in kWh/m²,

c Umrechnungsfaktor c in min·m²/kWh,

w Wärmeabzugsfaktor zur Berücksichtigung der Ventilationsbedingungen.

Die Ermittlung von t_a erfolgt grundsätzlich global für den gesamten Brandabschnitt. Gegebenenfalls müssen aber auch mehrere Ebenen, Teilflächen und Teilabschnitte berücksichtigt werden. Das Prinzip zur Ermittlung der äquivalenten Branddauer wird in Bild 6.27 dargestellt. Die äquivalente Branddauer t_a beschreibt den Zeitpunkt, zu dem bei einem ETK-Normbrand annähernd die gleichen Brandwirkungen wie bei einem natürlichen Brand entstehen. Als Maßstab für die Brandwirkung werden die Bauteiltemperaturen bei einem natürlichen Brand und dem Normbrand verglichen. Die äquivalente Branddauer t_a ist dann der Zeitpunkt, zu dem die Bauteiltemperatur im Normbrand den maximalen Wert der Bauteiltemperatur bei einem natürlichen Brand erreicht.

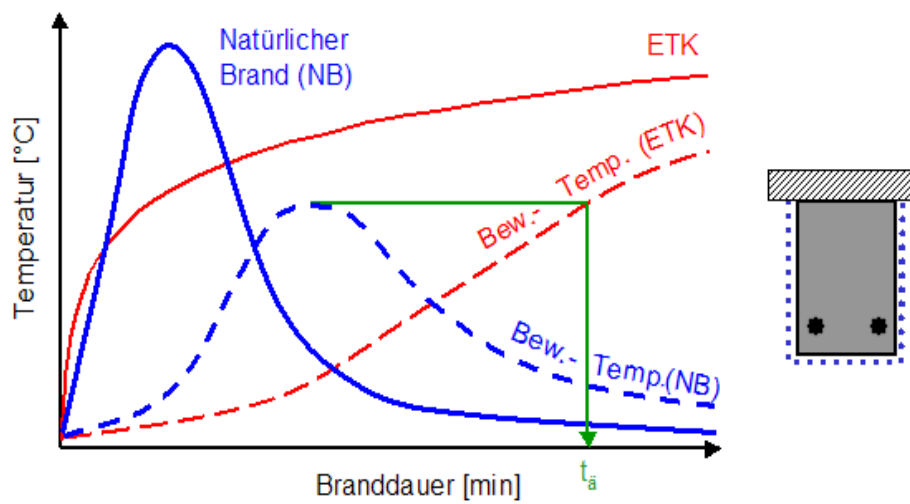


Bild 6.27 Bestimmung der äquivalenten Branddauer t_a

Die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer t_F wird nach Gleichung (6.18) bestimmt.

$$\text{erf } t_F = t_a \cdot \gamma \cdot \alpha_L \quad (6.18)$$

mit

γ Sicherheitsbeiwert für Bauteile der Brandsicherheitsklasse SK_b 3, SK_b 2 und SK_b 1,

α_L Zusatzbeiwert zur Berücksichtigung der brandschutztechnischen Infrastruktur.

Die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer t_F nach Gleichung (6.18) wird abschließend der Benennung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102 bzw. DIN EN 13501-2 zugeordnet.

Bei Anwendung der DIN 18230-1 müssen alle Randbedingungen der Norm hinsichtlich der Bewertung von geschützten und ungeschützten Brandlasten, Heizwert und Abbrandfaktor der brennbaren Stoffe, Geschossigkeit des Gebäudes, Brandbekämpfungsabschnitte mit Teilabschnitten oder Teilflächen beachtet werden.

6.10 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Nachweisführung für Bauteile und Tragwerke im Brandfall vorgestellt. Die in den Landesbauordnungen verankerten Feuerwiderstandsklassen feuerhemmend, hochfeuerhemmend und feuerbeständig sind fest an die Einheits-Temperaturzeitkurve gekoppelt. Für den Brandschutz-Nachweis bieten die Eurocodes dazu grundsätzlich drei gleichwertige Nachweisverfahren auf unterschiedlichen Ebenen an.

Die Nachweise der Ebene 1 (Tabellarische Bemessungsverfahren) können durch einen einfachen Vergleich mit Tabellenwerten durchgeführt werden. Die vereinfachten Bemessungsverfahren der Ebene 2 orientieren sich an den Tragwerksnachweisen für die Gebrauchslastfälle bei Normaltemperatur und sind daher den Tragwerksplanern vertraut. Zusätzlich sind jedoch spezielle brandschutztechnische Besonderheiten zu berücksichtigen. Die erweiterten Bemessungsverfahren der Ebene 3 ermöglichen eine exakte numerische Simulation des Trag- und Verformungsverhalten beliebiger brandbeanspruchter Bauteile oder Gesamttragwerke.

Das Tabellarische Bemessungsverfahren eignet sich für eine Vielzahl von Stahlbetonbauteilen und Verbundbauteilen als Schnellnachweis mit geringem Aufwand. Wenn die Anwendungsvoraussetzungen der Tabellen nicht erfüllt sind oder die Mindestabmessungen für die geforderte Feuerwiderstandsklasse nicht eingehalten werden, bieten die vereinfachten Bemessungsverfahren eine Alternative mit einem geringfügig größeren Rechenaufwand. Die Ergebnisse sind für gleiche Bauteile in der Regel etwas günstiger als beim tabellarischen Nachweis. Wenn das Bemessungsziel dann immer noch nicht erreicht wird, bleibt das erweiterte Bemessungsverfahren zur vollständigen numerischen Simulation des Tragverhaltens die letzte Alternative, die jedoch einen erhöhten Rechenaufwand mit sich bringt. Hierfür sind eine geeignete, für den betreffenden Anwendungsbereich validierte Software und einschlägige Kenntnisse und Erfahrungen des Anwenders erforderlich. Die Ergebnisse der erweiterten Bemessungsverfahren sind für gleiche Bauteile in der Regel günstiger als beim vereinfachten Bemessungsverfahren. Neben den Bauteilnachweisen auf Grundlage der ETK können gemäß den Eurocodes auch leistungsorientierte Nachweise mit einem Naturbrandmodell durchgeführt werden. Brandschutznachweise auf Basis von Naturbrandmodellen stellen eine Abweichung gegenüber den auf Basis der ETK formulierten bauaufsichtlichen Anforderungen dar, die einer Genehmigung durch die Bauaufsicht bedürfen. Für die thermische und mechanische Analyse des Bauteils oder Tragwerkes kann mit Ausnahme des vereinfachten Bemessungsverfahrens für Stahlbauteile nur das erweiterte Bemessungsverfahren der Ebene 3 angewendet werden. Das Bauteil muss den gesamten Brandverlauf überstehen. Da nicht eindeutig vorherbestimmt werden kann, welcher Zeitpunkt der kritische ist, muss der gesamte Brandverlauf berechnet werden.

Bei Anwendung der erweiterten Bemessungsverfahren muss beachtet werden, dass die numerische Modellierung des Abplatzverhaltens von Beton- und Mauerwerkskonstruktionen noch ungelöst ist, dass das Verhalten der Bauteile und Tragwerke hinsichtlich Schubtragfähigkeit, Vermeidung von lokalem Beulen bei Stahlkonstruktionen, Verbundverhalten und ausreichender Rotationsfähigkeit bei Durchlaufsystemen durch konstruktive Maßnahmen, geeigneter Bemessung und Querschnittsausbildung sowie sinnvoller Bewehrungsführung bei Stahlbetonbauteilen sichergestellt werden muss. Die in den Eurocodes angegebenen thermischen Materialeigenschaften und temperaturabhängigen Festigkeitseigenschaften sind nur für ansteigende Bauteiltemperaturen abgesichert. Für die Abkühlphase eines Brandes liegen bisher

nur wenige Kenntnisse vor. Die Konsistenz von Verformungs- und Tragverhalten muss immer gegeben sein. Ein Tragwerk, welches rechnerisch nicht versagt, dessen Verformungen durch die thermische Belastung jedoch übermäßig anwachsen, darf in der Bemessungspraxis nicht als brandschutztechnisch ausreichend bemessen eingestuft werden. Hinweise zur Beurteilung der zulässigen Verformung werden in diesem Kapitel gegeben.

6.11 Literatur

- [6.1] DIN EN 1991-1-2:2010-12, Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009.
- [6.2] 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 + AC:2008.
- [6.3] DIN EN 1993-1-2:2010-12, Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1993-1-2:2005 + AC:2009.
- [6.4] DIN EN 1994-1-2:2010-12, Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-2: Allgemeine Regeln Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1994-1-2:2005 + AC:2008.
- [6.5] DIN EN 1995-1-2:2010-12, Eurocode 5 – Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Bemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009.
- [6.6] DIN EN 1996-1-2:2011-04, Eurocode 6 – Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1996-1-2:2005 + AC:2010.
- [6.7] DIN EN 1999-1-2:2010-12, Eurocode 9 – Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [6.8] Nationaler Anhang zu DIN EN 1991-1-2/NA, Ausgabe September 2015
 Nationaler Anhang zu DIN EN 1992-1-2/NA, Ausgabe Dezember 2010
 Nationaler Anhang zu DIN EN 1993-1-2/NA, Ausgabe Dezember 2010
 Nationaler Anhang zu DIN EN 1994-1-2/NA, Ausgabe Dezember 2010
 Nationaler Anhang zu DIN EN 1995-1-2/NA, Ausgabe Dezember 2010
 Nationaler Anhang zu DIN EN 1996-1-2/NA, Ausgabe Juni 2013
 Nationaler Anhang zu DIN EN 1999-1-2/NA, Ausgabe März 2011
 Beuth Verlag, Berlin.
- [6.9] *STEINERT, C.*: Bestimmung der Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall. Abschlussbericht im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn, Az.: Ko 204 / 38 - 1, Braunschweig, 1996.

- [6.10] DIN 4102. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 3: Brandwände und nichttragende Außenwände, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe September 1977.
- [6.11] *HOSSER, D.; KAMPMEIER, B.; ZEHFUSS, J.*: Überprüfung der Anwendbarkeit alternativer Ansätze nach Eurocode 1 Teil 1-2 zur Festlegung von Brandschutzanforderungen bei Gebäuden. Schlussbericht des Forschungsvorhabens Az. ZP 52-5-3.83-1041/03 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 2004.
- [6.12] *ZEHFUSS, J.*: Naturbrandverfahren für die Bauteilbemessung – Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen. In: Jahresfachtagung 2013 der vfdb, Weimar, 27. bis 29. Mai 2013, Tagungsband. Altenberge: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), 2013.
- [6.13] Änderungen der Musterliste der technischen Baubestimmungen vom September 2012. www.is-argebau.de.
- [6.14] *ZEHFUSS, J.; HOSSER, D.*: Vereinfachtes Naturbrandmodell für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken, In: Bauphysik 27 (2005) Heft 2. S. 79-86.
- [6.15] *ZEHFUSS, J.; HOSSER, D.*: A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. In: Fire Safety Journal 42 (2007), Elsevier Ltd., S. 115-126.
- [6.16] *SANDSTRÖM, J.*: Temperature calculations in fire exposed structures with the use of adiabatic surface temperatures. Technische Universität Lulea, Schweden, 2008.
- [6.17] *WICKSTRÖM, U.*: Adiabatic Surface Temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures. Swedish National Testing and Research Institute (SP), Borås, Sweden.
- [6.18] DIN EN 1990:2002-10. Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Fassung EN 1990:2002.
- [6.19] DIN EN 13501-2:2010-02, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2007+A1:2009.
- [6.20] *KORDINA, K.; EHM, H; POSTEL, R.*: Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 230, Berlin, 1975.
- [6.21] *SPILLE, J.; ZEHFUSS, J.*: Neuer Ansatz der thermischen Leitfähigkeit von Beton für die Brandschutzbemessung in Eurocode 2. In: Bautechnik, Berlin, 2019.
- [6.22] *ZEHFUSS, J.; SPILLE, J.*: Bewertung überarbeiteter Rechengrundlagen zur Wärmeleitfähigkeit im Zuge der Novellierung von EN 1992-1-2. Abschlussbericht im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt). Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2018.

- [6.23] *KORDINA, K.; MEYER-OTTENS, C.*: Beton Brandschutz Handbuch. 2. Auflage, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 1999.
- [6.24] DIN EN 1363-1:2012-10, Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1363-1:2012.
- [6.25] ISO PDTR 15657 FRT – Guidelines for computational structural fire design. 20.01.2012.
- [6.26] prEN 1992-1-2 (2019-10): Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General – Structural fire design.
- [6.27] *JENSEN, J. F.*: New Annex B – tabulated data for columns. Version 2019-04-09.
- [6.28] *FINGERLOOS, F.; ZEHFUß, J.; CYLLOK, M.*: Heißbemessung von Stahlbeton- und Spannbetonstützen – Zur praktischen Anwendung von Methode A in DIN EN 1992-1-2. In: Beton- und Stahlbetonbau 113, Heft 08/2018, S. 564-570.
- [6.29] *ZEHFUSS, J.; FELIX, D.*: Derivation of alternative design tables for the fire design of concrete walls with advanced calculation methods according to EN 1992-1-2. Report PraxisRegelnBau, 2019.
- [6.30] *MITTMANN, T.*: Brandschutzbemessung im Mauerwerksbau. In: Hosser, D.; Zehfuß, J. (Hrsg.): Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes. Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6. Beuth-Kommentar, 3. Auflage 2017 Berlin, Wien: Beuth Verlag.
- [6.31] *ZEHFUß, J.; KAMPMEIER, B.*: Baulicher Brandschutz. In: Holschemacher, K. (Hrsg.): Entwurfs- und Berechnungstabellen für Bauingenieure. 8. Auflage. Beuth-Verlag, Berlin, 2019.
- [6.32] *SCHAUMANN, P.*: Brandschutznachweise für ungeschützte Stahlkonstruktionen – Näherungsformeln für die Erwärmung nach ETK. Bundesbaublatt, Heft 7, S. 69-71, 1999.
- [6.33] *HOSSEER, D.* (Hrsg.): Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes. Beuth-Kommentar. Erläuterungen und Anwendungsbeispiele zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 5,. 2. Auflage. Beuth-Verlag Berlin, 2012.
- [6.34] prEN 1993-1-2 (2019-10): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General – Structural fire design.
- [6.35] *BOTH, C.*: The Fire Resistance of Composite Steel-Concrete Slabs. Dissertation TNO Building and Construction Research, Delft, 1998.
- [6.36] *SCHAUMANN, P., KETTNER, F., HEISE, A., HOTHAN, S.*: Tragwerksbemessung für den Brandfall bei Verbundtragwerken. Abschlussbericht zum DIBt-Forschungsvorhaben Z 52-5-17.17-1124/04, 2005.
- [6.37] *DORN, T.*: Brandschutzbemessung im Verbundbau. Beitrag in: Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes, Beuth-Kommentar, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich. 1. Auflage 2000.
- [6.38] *HOSSEER, D.; DORN, T.; EL-NESR, O.*: Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen. Stahlbau 63, Heft 3, 1994.

- [6.39] prEN 1993-1-2 (2019-05): Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design.
- [6.40] *HAKSEVER, A.; KRAMPF, L.*: Möglichkeiten, nachträglich die in einem Betonbauteil während eines Schadenfeuers aufgetretenen Temperaturen abzuschätzen. Beitrag in: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 352, Berlin, 1984.
- [6.41] *RICHTER, E.*: Zur Berechnung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Spannbetonbauteile unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen für die Materialgesetze, Heft 80 des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, 1987.
- [6.42] *SCHNEIDER, U.; DIEDERICHS, U.; WEIß, R.*: Hochtemperaturverhalten von Festbeton. Sonderforschungsbereich 148 – Brandverhalten von Bauteilen. Arbeitsbericht 1975 - 1977. Teil II, Technische Universität Braunschweig, Juli 1977.
- [6.43] *ZEHFUSS, J.; LYZWA, J.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erweiterung der Berechnungsgrundlagen unterschiedlicher Betone bei Naturbrandbeanspruchung. Durch Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördertes Forschungsvorhaben, Abschlussbericht, 2019..
- [6.44] *ZEHFUSS, J.; LYZWA, J.*: Thermische Materialeigenschaften von Beton in der Abkühlphase. Braunschweiger Brandschutztag '2017. Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig, Heft 232, 2017.
- [6.45] *LYZWA, J.; ZEHFUSS, J.*: Thermo-mechanical material properties of concrete in the cooling phase. The seventh international conference on structural engineering, mechanics and computation (SEMC 2019) in Cape Town, ZAF, 2019.
- [6.46] *LYZWA, J.; ZEHFUSS, J.*: Experimental Investigations of ultra-high performance concrete exposed to natural fires. In: Fire Safety Journal, zur Veröffentlichung eingereicht.
- [6.47] *ZEHFUSS, J.; SANDER, L.; SCHAUMANN, P.; Weisheim, W.*: Schlussbericht „Prüfverfahren für thermische Materialkennwerte von Brandschutzbekleidungen und reaktiven Brandschutzsystemen für die Bemessung von Stahltragwerken bei Naturbränden“, IGF-Projekt Nr. 19176 N, Institute für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig, Institut für Stahlbau Leibniz Universität Hannover, 2018.
- [6.48] *HOSSER, D.; RICHTER, E.; ZEHFUSS, J.*: Erarbeitung von nationalen Anwendungsrichtlinien für rechnerische Nachweise nach den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 - 5. Abschlussbericht im Auftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, Az.: RS III - 4 - 6741 - 97.120, Braunschweig, März 2002.
- [6.49] *ZEHFUSS, J.; RICHTER, E.*: Bewertungskriterien für rechnerische Brandschutznachweise nach den Eurocodes. Braunschweiger Brandschutztag '99. 8. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig, Heft 145, Braunschweig, 1999.
- [6.50] *ZEHFUSS, J.*: Bewertungskriterien für Rechenprogramme von Eurocode-Nachweisen. vfdB-Zeitschrift 02/2013 S. 63-69. Ebner Verlag, Bremen.

- [6.51] *HASS, R.*: Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton, Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 1986.
- [6.52] DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [6.53] *SCHUCK, W., HAACK, A., RICHTER, E., STÄDING, A.*: Brandschutz bei Eisenbahntunneln mit einschaligem Tübbingausbau. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2011, VGE Verlag GmbH, Essen.
- [6.54] *HOSSER, D.; SIEMON, M.; KAMPMEIER, B.; HOLLMANN, D.; KRUSE, D.; DEPPE, B.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung und Optimierung des Brandverhaltens von ultrahochfestem Beton (UHFB), Abschlussbericht im Rahmen des SPP 1182, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig, 2013.
- [6.55] *HORVATH, J.; DEHN, F.*: Abplatzverhalten von selbstverdichtendem Beton (SCC), Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H, 2003.
- [6.56] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2012-09): Selbstverdichtender Beton, SVB-Richtlinie.
- [6.57] *HOLZ, K.; CURBACH, M.*: Zugtragverhalten von Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung. In: Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) Heft 1, S 1-9.
- [6.58] *FALKNER, H. ; GERRITZEN, D.; JUNGWIRTH, D.; SPAROWITZ, L.*: Das neue Bewehrungssystem ; Druckglieder mit hochfestem Betonstahl SAS 670/800 - Teil I: Entwicklung, Versuche, Bemessung und Konstruktion. Beton- und Stahlbetonbau 103 (Heft 5) S. 304-317, 2008.
- [6.59] *LANGE, J.; WOHLFEIL, N.*: Untersuchungen zum Werkstoffverhalten des Feinkornbaustahls S 460 unter erhöhten Temperaturen. In: Bautechnik 84 (2007), Heft 10, S. 711-720.
- [6.60] *MENSINGER, M.*: Feuerwiderstand von feuerverzinkten, tragenden Stahlkonstruktionen im Brandfall. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18887 N. München, 27.11.2018.
- [6.61] *BERGMANN, M.*: Zur Bemessung von Hohlprofilverbundstützen im Brandfall, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2013.
- [6.62] *KLEIBÖMER, I.*: Zum Verbundverhalten ausbetonierter Hohlprofilstützen mit massivem Stahlkern im Brandfall, Dissertation, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, 2018.
- [6.63] *ROMERO, M. L. et al.*: Slender double-tube ultra-high strength concrete-filled tubular columns under ambient temperature and fire. Engineering Structures (2015), Vol. 99, S. 536-545.
- [6.64] DIN 4102-04:2016-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile.

6 Brandschutztechnische Nachweise für Bauteile und Tragwerke

- [6.65] *HAHN, C.*: DIN 4102-4 - Ergänzende Regelungen zu den Brandschutzteilen der Euro-codes. Braunschweiger Brandschutz-Tage 2011. Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig, Heft 214, 2011.
- [6.66] DIN 18230-1:2010-09, Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer.

ANHANG ZU KAPITEL 6

A6.1 Ringberechnung

A6.1.1 Stahlstütze

Randbedingungen:

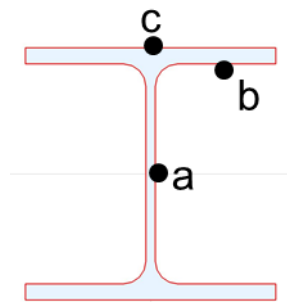
- Brandbelastung: ETK (allseitig),
- Belastung: 1530 kN,
- Exzentrizität: 3cm,
- Kopf- & Fußplatte angeschweißt,
- Länge der Stütze: 3,64 m,
- Beflammte Stützenlänge: 3,24 m,
- Statisches System (im Prüfofen): gelenkig – gelenkig.



Bild 6.28 eingebaute Stütze im Versuchsofen (rechts) und statisches System (links)

Auswertung von 5 Simulationen mit unterschiedlichen Programmen (A-E):

1. Temperatur-Zeitverläufe ($^{\circ}\text{C} / \text{min}$) auf einer Höhe von 1,60 m gemessen vom Stützenfuß
 - a. Oberflächentemperatur Stegmitte
 - b. Oberflächentemperatur Unterkante Flansch $\frac{1}{4}$ Punkt
 - c. Oberflächentemperatur Oberkante Flanschmitte



2. Horizontale Verformung (in mm) bei 1,60 m gemessen vom Stützenfuß

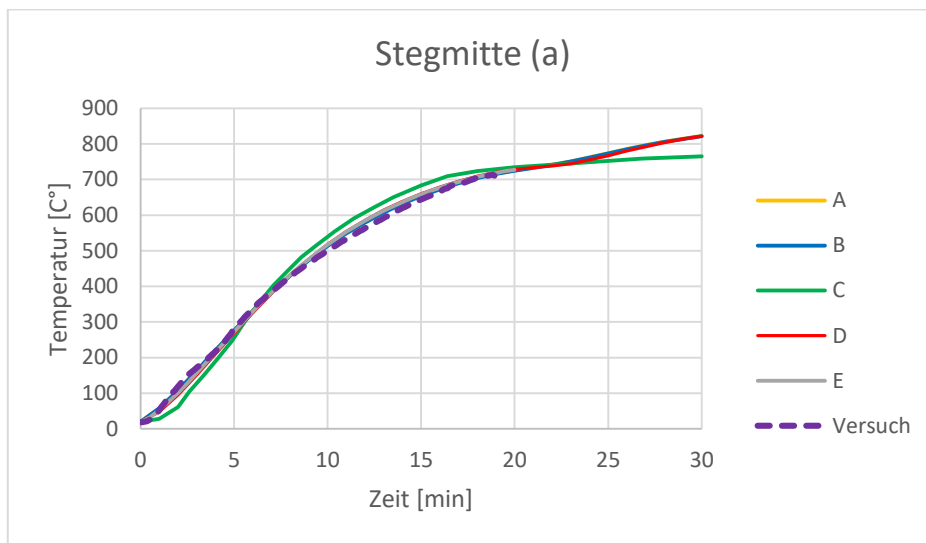


Bild 6.29 Temperatur-Zeitverlauf Messpunkt a (Stegmitte)

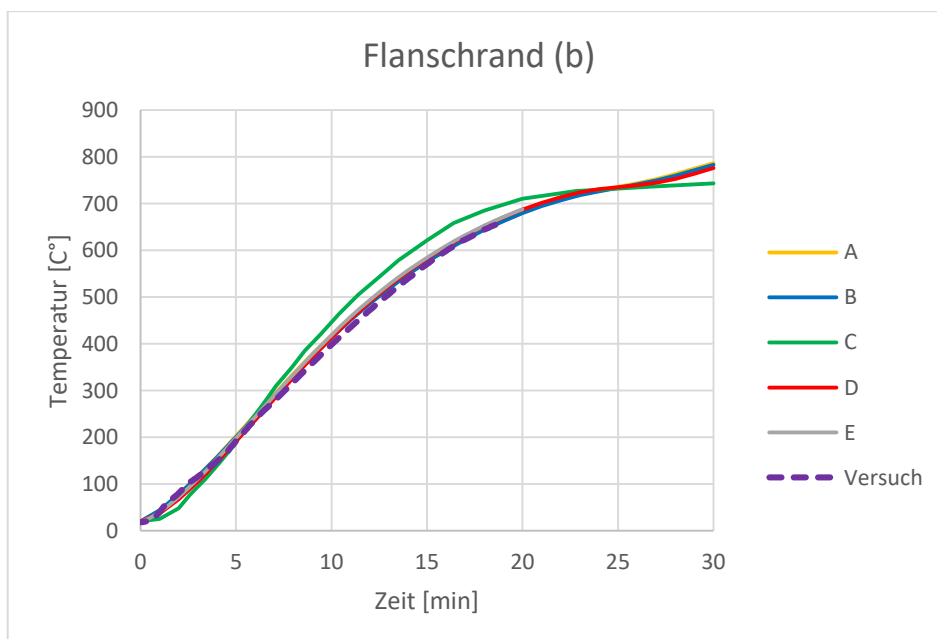


Bild 6.30 Temperatur-Zeitverlauf Messpunkt b (Unterkante Flansch ¼ Punkt)

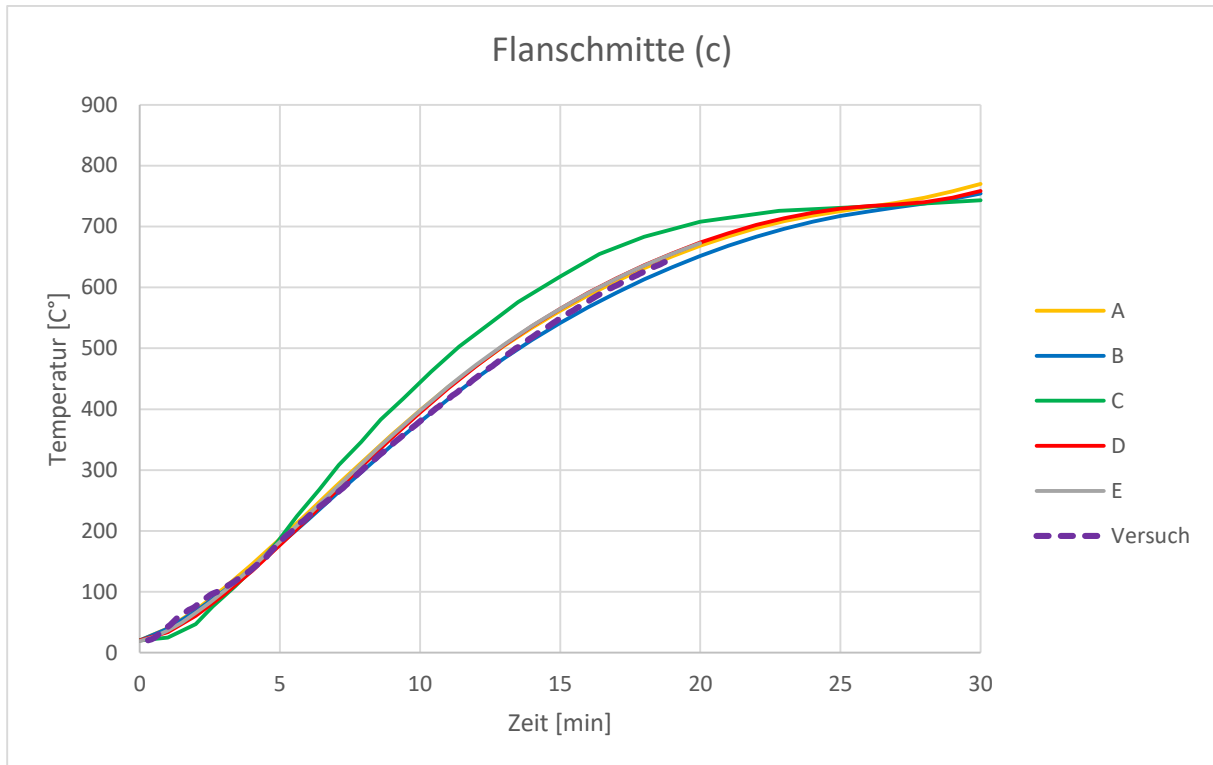


Bild 6.31: Temperatur-Zeitverlauf Messpunkt c (Oberkante Flanschmitte)

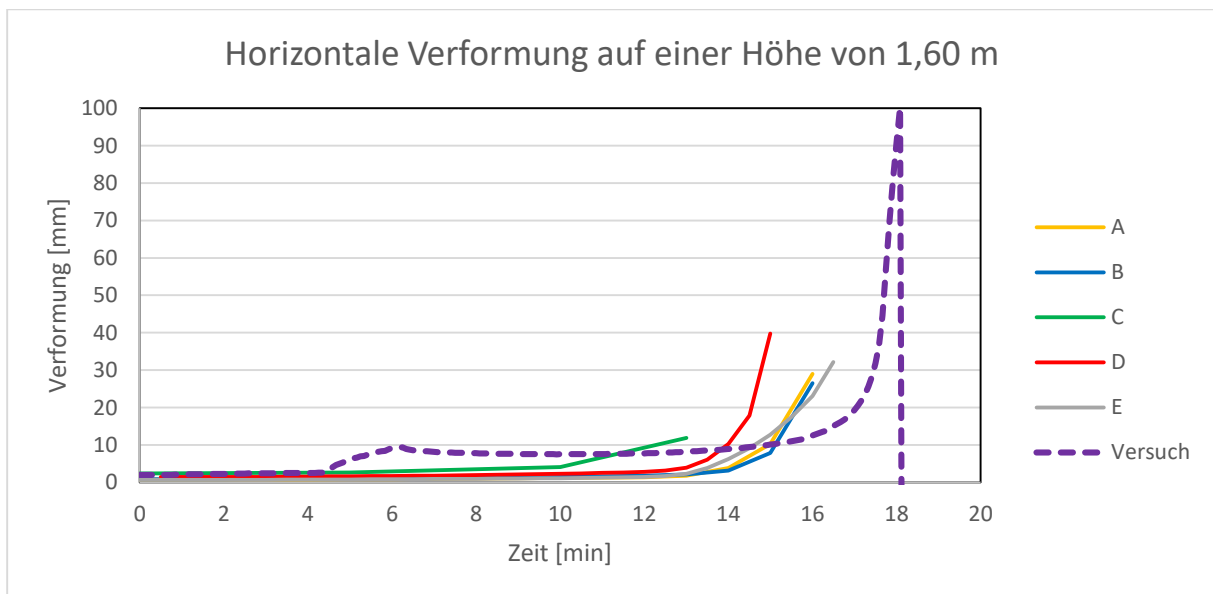
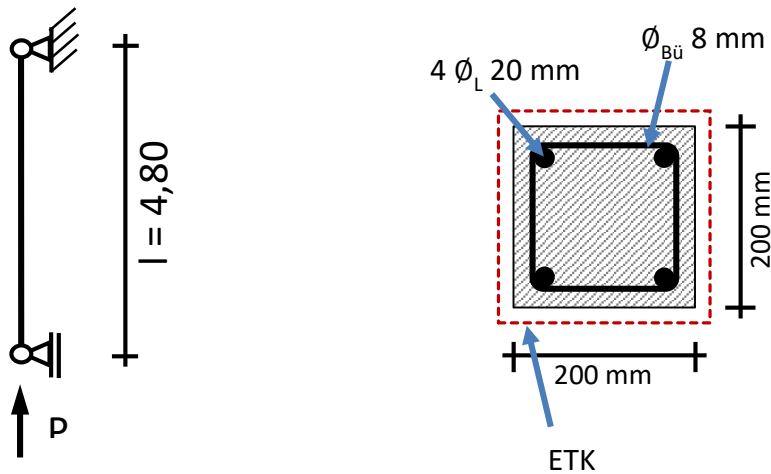


Bild 6.32 Verformungs-Zeitverläufe auf einer Höhe von 1,60 m gemessen vom Stützenfuß

Ein Versagen der Stahlstütze trat im Versuch zur 18. Minute ein (vgl. Bild 6.32). Hinsichtlich der thermischen Analysen stimmen die berechneten Temperaturen in 4 von 5 Simulationen sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein (vgl. Bild 6.29 und Bild 6.31). Der berechnete Versagenszeitpunkt liegt in allen Simulationen vor dem tatsächlichen Versagenszeitpunkt im Versuch.

A6.1.2 Stahlbetonstütze

Statisches System (im Prüfofen):



Einwirkungen:

Aufgebrachte Last im Versuch: $P = 340 \text{ kN}$ mit $e_0 = 0 \text{ mm}$

Temperatur: ETK

Beflammte Fläche: allseitige Beflammung gemäß ETK über die lichte Brandraumhöhe

Vorverformung: Variierender Parameter ($L/1000$, $L/1500$ und $L/2000$)

Gemessene Vorverformung: Ausbiegung nach Belastung $v_0 = 0,4 \text{ mm}$ ($t=0$) in einer Höhe von $2,05 \text{ m}$ bei einer Stützenlänge von $4,80 \text{ m}$

Stützenlänge:

Stützenlänge: $4,80 \text{ m}$

Lichte Brandraumhöhe: $4,60 \text{ m}$ (von Oberkante Fußboden bis Unterkante Decke; beflammt Stützenlänge)

Stützenquerschnitt:

Stützenabmessung: $b/h = 200 / 200 \text{ mm}$

Achsabstand: 40 mm

Längsbewehrung: $4 \text{ } \varnothing 20$

Bügelbewehrung: $\varnothing B_{\text{ü}} = 8 \text{ mm}$

Bügelabstand: $a = 20 \text{ cm}$

Baustoffe:

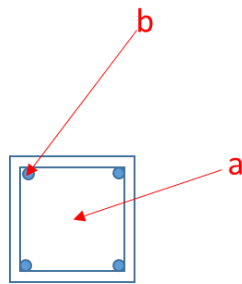
Beton: C 20/25, die gemessene Betonfestigkeit beträgt $22,3 \text{ N/mm}^2$, der Feuchtegehalt des Betons beträgt 3% .

Bewehrung: BSt 420/500

Die Vorverformung ist parabelförmig aufzugeben.

Auswertung von 5 Simulationen mit unterschiedlichen Programmen (A-B, D-E):

1. Temperatur-Zeitverläufe ($^{\circ}\text{C} / \text{min}$)
 - a. Querschnittszentrum
 - b. Temperatur in der Stabachse der Längsbewehrung



2. Horizontale Verformung (mm) bei 2,05 m gemessen vom Stützenfuß

Auswertung:

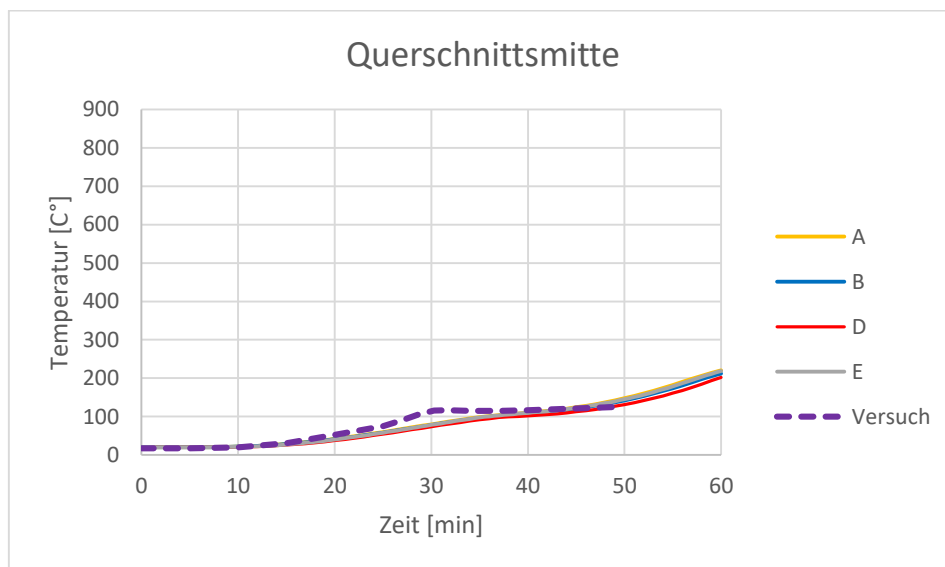


Bild 6.33 Temperatur-Zeitverlauf Messpunkt a (Querschnittszentrum)

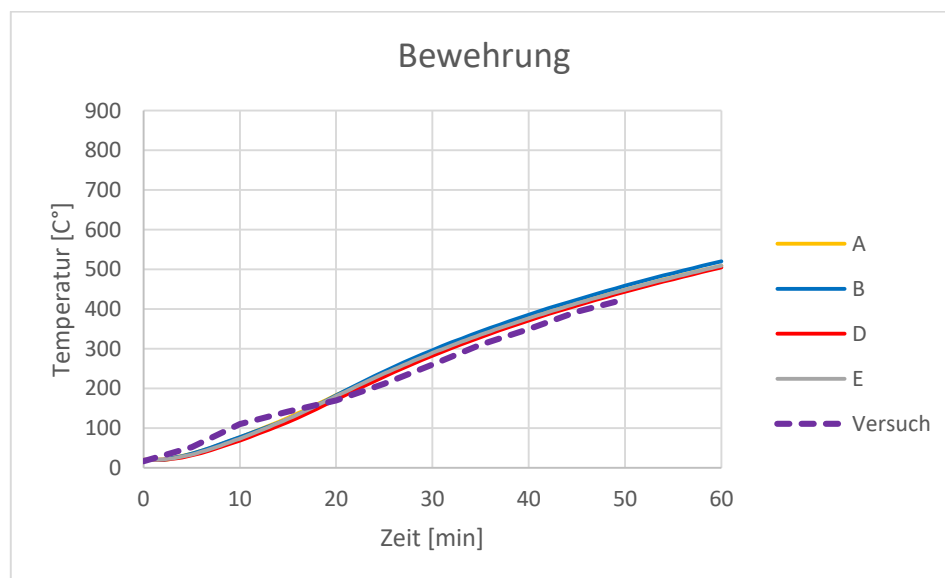


Bild 6.34 Temperatur-Zeitverlauf Messpunkt b (Stabachse der Längsbewehrung)

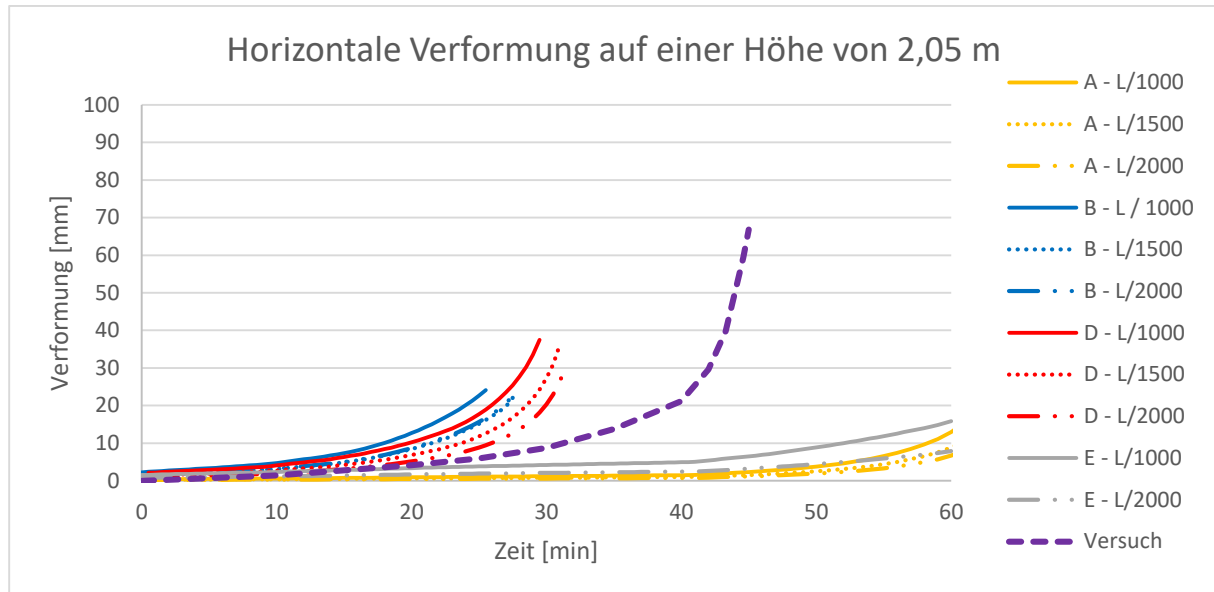


Bild 6.35 Verformungs-Zeitverläufe auf einer Höhe von 2,05 m gemessen vom Stützenfuß

Ein Versagen der Stahlbetonstütze im Versuch trat zur 48. Minute ein (vgl. Bild 6.35). Hinsichtlich der thermischen Analysen stimmen die berechneten Temperaturen im Querschnittszentrum sowie in der Stabachse der Längsbewehrung gut mit den Versuchsergebnissen überein (vgl. Bild 6.33 und Bild 6.34). Der berechnete Versagenszeitpunkt liegt in zwei Fällen vor dem tatsächlichen Versagenszeitpunkt, in den weiteren zwei Fällen darüber. Begründet werden können diese Unterschiede u. a. durch die im Rahmen der Modellbildung gewählten Lagerungsbedingungen. Während in den Fällen der kürzeren Feuerwiderstandsdauern eine gelenkig-gelenkig Lagerung für die Berechnung zu Grunde gelegt wurde, wurde für die weiteren Fälle eine beidseitig rotationsbehinderte Stütze angenommen. Durch die versuchstechnisch konstruktiv ausgeführte Lagerung, liegt die tatsächliche anzunehmende Lagerungsbedingung zwischen einer ideal-gelenkigen und einer rotationsbehinderten Lagerung. Die numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einfluss des variierenden Parameters Vorverformung verhältnismäßig gering ist.

7 ANLAGENTECHNISCHER UND ABWEHRENDER BRANDSCHUTZ

7.1 Allgemeines

Anlagentechnische und abwehrende Brandschutzmaßnahmen können maßgeblich die Dauer der Brandentwicklung und die damit verbundenen unmittelbaren sowie mittelbaren Brandfolgen beeinflussen und somit wirksam zur Risikobegrenzung beitragen. Unter diesem Aspekt sind zu betrachten:

- Brandmeldeanlagen,
- Feuerlöschanlagen,
- Rauch- und Wärmeabzugsanlagen sowie
- der Löscheinsatz der Feuerwehr.

Die Wirkung dieser Brandschutzmaßnahmen auf das Brandszenario wird bei der klassischen (präskriptiven) Brandschutzauslegung (vgl. Bild 1.1. in Kapitel 1) nicht direkt (quantitativ) berücksichtigt, sondern indirekt (qualitativ) zur Kompensation von Abweichungen gegenüber üblichen bauordnungsrechtlichen Anforderungen an den baulichen Brandschutz oder von erhöhten Brandrisiken (Gebäudeart und deren Nutzung) herangezogen. Lediglich im Industriebau wird die Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch anlagentechnische und abwehrende Maßnahmen auch quantitativ sichtbar, indem die brandschutztechnische Infrastruktur entweder vereinfacht über die Einteilung in Sicherheitskategorien [7.1] oder über einen aus Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen abgeleiteten Bewertungsfaktor α_L [7.2] in die Anforderungen hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer der Bauteile eingeht.

Im Rahmen von ingenieurtechnischen Methoden des Brandschutzes kann einerseits die günstige Wirkung anlagentechnischer Maßnahmen auf das Brandszenario über den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates quantitativ erfasst werden. Andererseits muss dann aber auch der Einfluss auf die Zuverlässigkeit der gesamten Brandschutzmaßnahmen berücksichtigt werden, weil die brandschutztechnische Infrastruktur im Anforderungsfall mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausfallen kann. Es sind also grundsätzlich verschiedene Brandszenarien – mit auslegungsgemäßer Wirkung der anlagentechnischen und / oder abwehrenden Brandschutzmaßnahmen zu betrachten.

Die Wirksamkeit W (auch Effektivität) von Schutzmaßnahmen ermittelt sich aus dem Verhältnis zwischen dem tatsächlich erreichten Schutzziel zum vorgegebenen Schutzziel (Auslegungskriterium) im Anforderungsfall, d. h. im realen Brandfall [7.62].

$$W_{\text{Effektivität}} = \frac{\text{Schutzziele (erreicht)}}{\text{Schutzziele (vorgegeben)}} \quad (7.1)$$

Unter Wirksamkeit wird die Effektivität eines Systems im Falle eines Brandes verstanden. Um ihre Wirkung auf den Brandverlauf zu entfalten und eine möglichst hohe Wirksamkeit zu erreichen ist es erforderlich, dass die Systeme/Maßnahmen zuverlässig funktionieren. Unter Zuverlässigkeit wird die Eigenschaft eines brandschutztechnischen Systems verstanden, die in der Spezifikation festgelegten Funktionen unter den Auslegungsbedingungen während eines bestimmten Zeitintervalls ausfallfrei auszuführen. Sie wird angegeben als Wahrscheinlichkeit, mit der im Zeitintervall kein Ausfall der Funktion erfolgt [7.31].

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass bei der Anwendung von Ingenieurmethoden im Regelfall die Schwelbrandphase nicht berücksichtigt wird, sondern ein Brand mit Flammerscheinung angenommen wird. Gerade die Schwel- und Glimmbrandphase (als Sonderform des Glutbrandes) kann von der zur Verfügung stehenden Brandmeldersensorik zuverlässig erfasst werden.

Eine genauere Analyse des Gesamtsystems der Brandschutzmaßnahmen ist mit den Methoden in Kapitel 10 dieses Leitfadens auf Grundlage der Arbeiten in [7.3], [7.4], [7.5] möglich, aber im Allgemeinen für die Praxis zu aufwendig. Vereinfacht kann aufgrund von Risikobetrachtungen - unter Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Infrastruktur bzw. Löschmaßnahmen der Feuerwehr einerseits und der damit verbundenen stärkeren Brandentwicklung und höheren Brandschäden – das kritischere maßgebende Brandszenario bestimmt und nur dieses näher untersucht werden. Diese Vorgehensweise wurde in [7.1], [7.2] gewählt, indem der brandschutztechnischen Bemessung das mit der Ausfallwahrscheinlichkeit der Infrastrukturmaßnahmen auftretende Szenario eines voll entwickelten Brandes zu Grunde gelegt wird.

Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Frage, zu welchem Zeitpunkt ab Brandbeginn ein Einfluss auf den Brandverlauf angenommen werden kann, weil hiervon die Höhe der maximal auftretenden Wärmefreisetzungsrates und damit weiterer zusammenhängender Brandfolgen abhängt (vgl. Bild 7.1).

Der Verlauf von Bränden in Gebäuden ist von vielen Faktoren abhängig. Zu berücksichtigen ist neben der Bausubstanz, die zu Baubeginn relativ gut bewertbar ist, insbesondere die sich ständig ändernde Brandlast der technischen und nutzungsabhängigen Einrichtungen sowie die Auswirkungen der täglichen Nutzung des Gebäudes. Diese sind nur schwer fassbar. Erfahrungsgemäß beginnen Brandereignisse fester brennbarer Stoffe häufig als Schwelbrände, d. h. niedrigenergetische Oxidationsprozesse mit sehr geringer Wärme- und meist sehr intensiver Brandgas- und Rauchentwicklung. Die Zeitabstände von Beginn eines Schwelbrandes zum Entstehen eines offenen Brandes sind sehr verschieden und können sich im Minutenbereich bis zu mehreren Stunden hinziehen. Aufgrund der starken Brandgas- und Rauchentwicklung während der Schwelbrandphase kann sich der Einsatz von Brandmeldeanlagen mit automatischen Rauchmeldern besonders günstig auf die Zeitdauer der Brandentdeckung (Entdeckungszeit) [7.23] auswirken.



Bild 7.1 Ablaufdiagramm für die Brandbekämpfung durch Löschanlagen

Automatische Brandmeldeanlagen verkürzen insbesondere die Entdeckungszeit und die Meldezeit [7.23], sodass die Brandbekämpfung der Feuerwehr dadurch zu einem früheren Zeitpunkt beginnen kann. Sie beeinflussen damit in erster Linie den für die Bemessung anzunehmenden Gesamtenergiegehalt der Wärmefreisetzungsratekurve des zu betrachtenden Brandszenarios.

Damit der Wärmefreisetzungsrate nicht nur die Temperaturentwicklung sondern auch die Brandgas- und Rauchentwicklung beeinflusst wird, können automatische Brandmeldeanlagen in Verbindung mit der frühzeitigen Einleitung einer wirksamen Brandbekämpfung auch zur Reduzierung der insgesamt freigesetzten Brandgas- und Rauchmengen beitragen.

Wirksame sowie betriebssichere Lösch- und Brandbekämpfungsanlagen reduzieren sowohl das Maximum der Wärmefreisetzungsrate und begrenzen das Ausmaß eines Brandes, sodass die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr mit wirksamen Löschmaßnahmen unterstützt wird.

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen können die thermische Beanspruchung auf das Tragwerk verringern, dabei aber in Verbindung mit den vorhandenen Zuluftnachströmöffnungen die Luft-sauerstoffversorgung und damit die maximale Wärmefreisetzungsrate eines ventilationsgesteuerten Brandes erhöhen. Rauchabzugsanlagen können die Dicke einer Heißgasschicht verringern und damit die negativen Einflüsse von Sichttrübungen, Temperatur und toxischen Gaskonzentrationen auf die Personen mindern.

7.2 Brandmeldeanlagen

7.2.1 Allgemeines

Die Aufgabe einer automatischen Brandmeldeanlage (BMA) mit angeschlossener akustischer Alarmierungsanlage besteht darin, einen Brand in der Entstehungsbrandphase zu detektieren, Personen im Gebäude zu alarmieren, Brandschutz- und Betriebseinrichtungen automatisch anzusteuern, die Feuerwehr oder andere Hilfe leistende Stellen zu alarmieren und den Gefahrenbereich zu lokalisieren (nach DIN 14675 [7.48]).

Die Planung und Projektierung von Brandmeldeanlagen muss nach anerkannten Regeln der Technik erfolgen, insbesondere sind die DIN VDE 0833 [7.49] Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall Teil 1 und 2 und die DIN 14675 [7.48] zu beachten. Die BMA ist in der Regel Bestandteil des Brandschutzkonzeptes, sodass sie sich in ihrer Funktionsweise auch an den darin beschriebenen Parametern orientiert.

7.2.2 Arten von automatischen Brandmeldeanlagen

Unterschieden werden Brandmeldeanlagen hinsichtlich ihres Schutzzumfanges (Kategorien) in Vollschutz, Teilschutz, Schutz von Rettungswegen und Objektschutz. Brandmeldeanlagen können auch zur Ansteuerung von Brandschutzanlagen (z. B. Löschanlagen, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen) genutzt werden. Eine BMA besteht in der Regel aus einem Brandmeldesystem, automatischen Brandmeldern, Handfeuermeldern (nichtautomatischen Meldern, z. B. Druckknopfmeldern), Übertragungseinrichtungen, Alarmierungseinrichtungen, Brandfallsteuerungen usw..

Die Alarmweiterleitung eines Löschanlagenalarms (i.d.R. thermische Auslösung) zur zuständigen Feuerwehr erfolgt ebenfalls über eine Brandmeldeanlage. Dabei führt die Brandmeldeanlage die Funktion der Alarmweiterleitung aus, nicht die Funktion der Branderkennung.

Um Brände bereits in ihrem Frühstadium detektieren zu können, ist die Auswahl geeigneter punktförmiger, linienförmiger und linearer Brandmelder unerlässlich. Brandkenngrößen für unterschiedliche Brandmeldertypen sind Rauch, Wärme, Flammen usw..

Folgende Typen finden Verwendung:

- Wärmemelder (Differential, Maximal/Grenzwert),
- Rauchmelder (Durchlicht, Streulicht)

Bei den Rauchmeldern unterscheidet man zwischen Ionisationsrauchmeldern, optischen Rauchmeldern, linearen Rauchmeldern und Luftproben-Rauchmeldesystemen (Rauchansaugsysteme - RAS),

- Flammenmelder (Infrarot, Ultraviolett),
- Multisensor-/Mehrkriterien-Melder

Vermeint werden in der Praxis Multisensor- und/oder Mehrkriterien-Melder eingesetzt. Sie erfassen verschiedene Brandphänomene, werten unterschiedliche Kriterien aus und sind dadurch wesentlich robuster bezüglich Täuschungsgrößen. Optische Rauchmelder können durch Partikel in der Luft wie Staub oder Abgase beeinflusst werden. Durch die Bewertung des zeitlichen Verlaufs der Sensorsignale und der Einbeziehung verschiedener Brandkenngrößen (z. B. Rauch und Temperatur) in die Auswertung sind Multisensor-/Mehrkriterienmelder in der Lage, solche Täuschungsgrößen von realen Feuern zu unterscheiden,

- Handfeuermelder

Bei den Handfeuermeldern (Druckknopfmelder oder Springknopfmelder) handelt es sich um nichtautomatische Brandmelder. Sie dienen im Brandfall der manuellen Alarmierung.

Die Brandmelderzentrale dient der Anzeige, Bedienung, Überwachung und Verarbeitung der Signale der angeschlossenen Geräte. Sie vergleicht diese mit den gespeicherten Werten und aktiviert die entsprechenden Signalgeber und Brandfallsteuerungen. Optische und akustische Alarmgeräte alarmieren und orientieren die Personen im Gebäude wie auch die internen und externen Interventions- und/oder Gefahrenabwehrkräfte.

7.2.3 Wirkung von Brandmeldeanlagen auf das Brandszenario

Brandmeldeanlagen mit angeschlossenen akustischen Alarmierungseinrichtungen oder Sprachalarmanlagen (gem. DIN VDE 0833-4 [7.49]) wirken sich im Rahmen der Beurteilung der Auswirkungen von Brandszenarien zweifach aus:

- Durch die technische Branddetektion über eine BMA und Ansteuerung der optischen und/oder akustischen Alarmierungsanlage werden die sich im Gebäude befindlichen Personen alarmiert. Damit kann der Einsatz der Werk- oder öffentlichen Feuerwehr auf die Rettung von Personen beschränkt sein, denen eine Selbstrettung nicht möglich ist, wenn der betriebliche Brandschutz funktioniert.
- Die Brandentwicklungsdauer, d. h. die Zeitdauer bis zum Beginn der Brandbekämpfung wird verkürzt, was zur Folge hat, dass die Standsicherheit von Gebäuden im Brandfall positiv beeinflusst werden kann.

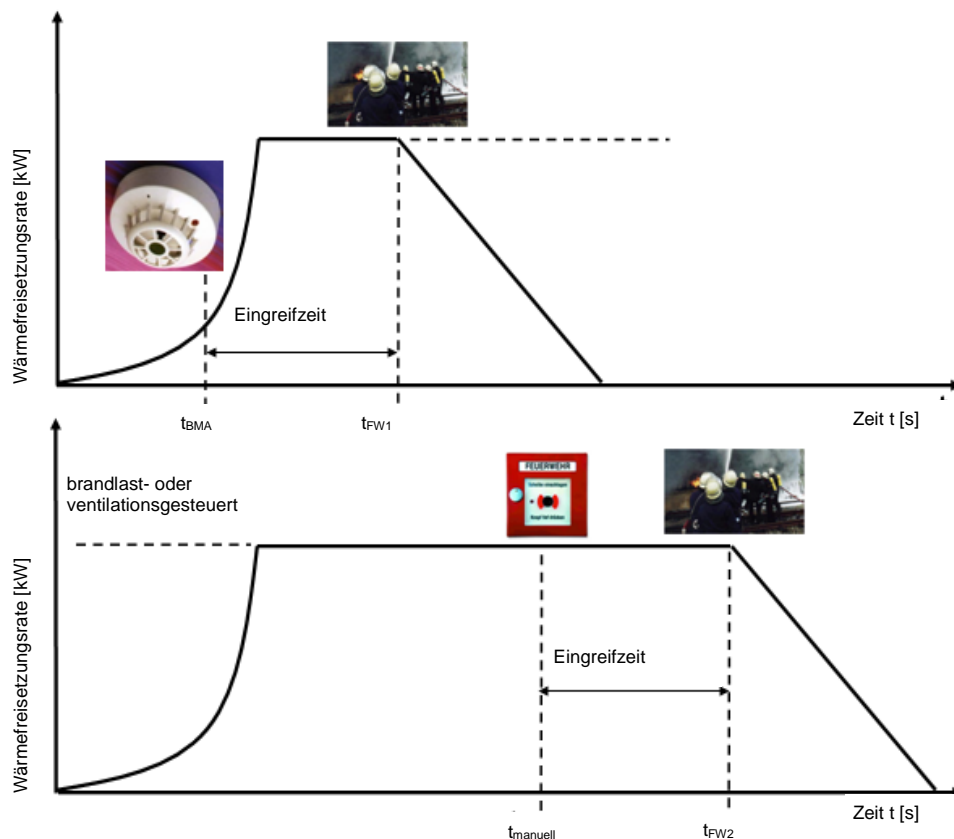
Die Brandentwicklungsdauer beginnt mit dem Ausbruch eines Brandes und endet mit dem Wirksamwerden der Brandbekämpfungsmaßnahmen. Die dabei zu berücksichtigenden Zeiträume setzen sich für Effektivitäts- und Effizienzbetrachtungen aus bis zu 10 verschiedenen Zeitabschnitten (vgl. auch DIN 14011 [7.23]) zusammen. Diese Zeitabschnitte können durch unterschiedliche Maßnahmen beeinflusst werden. Der Zeitraum mit den Zeitabschnitten von der Entdeckung eines Brandes bis zur Alarmierung der Gefahrenabwehrkräfte (Meldezeit, Dispositionszeit und Alarmierungszeit [7.23]) wird u. a. von den folgenden Parametern beeinflusst:

- Brandentwicklung: Je nach Art und Ablauf des Brandes entstehen verschiedene Mengen oder Intensitäten der verschiedenen Brandkenngrößen.
- Gebäudegeometrie: In hohen und großflächigen Räumen kann die Zeitspanne bis zur Detektion länger sein als in kleinen Räumen mit niedrigerer Deckenhöhe.
- Art der Brandlast: Bei einer Rauchmelderüberwachung und Brandlasten, die mit starker Rauchentwicklung brennen ist mit einer schnelleren Detektion zu rechnen.
- Überwachungsumfang nach DIN 14675 [7.48]: Werden in einer dreigeschossigen Ladenstraße nur unter dem Dach Rauchmelder angeordnet ist die Zeitspanne bis zur Detektion ungleich größer als bei Vollschutz nach DIN 14675 [7.48].
- Kenngröße der Melder: Rauchmelder lösen bei vielen Brandszenarien/Brandlasten schneller aus als z. B. Wärmemelder.
- Art der Maßnahme gegen Falschalarme gemäß DIN VDE 0833 [7.49]: Personelle Maßnahmen gegen Falschalarme können zu einem längeren Zeitverzug bis zur Ansteuerung der Übertragungseinrichtung führen als technische Maßnahmen wie z. B. die 2-Meldungsabhängigkeit [7.27], [7.28].

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

Im Einzelfall ist die Zeitspanne bis zur Detektion in Abhängigkeit der genannten Parameter konservativ abzuschätzen. Die Anwendung geeigneter Brandschutzingenieurmethoden, wie der Einsatz zeitabhängiger, allgemeiner Naturbrandmodelle, wie CFD-Modelle, kann bei der Ermittlung der Auslösezeit hilfreich sein.

Brandmeldeanlagen mit automatischen Meldern haben in Verbindung mit der Vorhaltung einer betrieblichen Feuerwehr (Werkfeuerwehr) einen Einfluss auf das bei ingenieurtechnischen Nachweisen angenommene Brandszenario, indem der Gesamtenergiegehalt der Wärmefreisetzungskurve ab dem Zeitpunkt der zeitnahen Brandbekämpfung abgemindert wird (Bild 7.2).



t_{FW1} Zeitspanne bis zum Löschangriff der ersten Einsatzkräfte am Einsatzort **mit** automatischen Meldern
 t_{FW2} Zeitspanne bis zum Löschangriff der ersten Einsatzkräfte am Einsatzort **ohne** automatische Melder

Bild 7.2 Einfluss von automatischen Brandmeldeanlagen auf den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungskurve (Eingreifzeit gemäß DIN 14011 [7.23])

Sind automatische Melder vorhanden, kann in der Regel eine Brandentdeckung in der Brandentstehungsphase angenommen werden. Die Zeitspanne von der Entdeckungszeit eines Brandes bis zum Löschangriff (Eingreifzeit [7.23]) und damit bis zum Beginn von Löschaßnahmen verkürzt sich, sodass die Abklingphase eher einsetzt. Eine Quantifizierung der Wirkung von automatischen Meldern kann aktuell gut in Verbindung mit Werkfeuerwehren erfolgen, weil die Hilfsfrist von öffentlichen Feuerwehren mit größeren Unsicherheiten verbunden ist und trotz länderspezifischer Vorgaben, beziehungsweise örtlicher Brandschutzbedarfspläne nur schwierig abgeschätzt werden kann.

Im Rahmen von Räumungsnachweisen mit Personenstromsimulationsmodellen gemäß Kapitel 9 wirken sich Brandmeldeanlagen mit automatischen Meldern in Verbindung mit Alarmierungsanlagen durch eine Verkürzung der Alarmierungs- und Reaktionszeit und damit eine Verringerung der erforderlichen Räumungszeit aus (siehe Kapitel 9.3).

7.2.4 Zuverlässigkeit von Brandmeldeanlagen

Die Betriebssicherheit von Brandmeldeanlagen (BMA) ist auf Grund der Produktnormung sehr hoch. Die Bestandteile von BMA entsprechen der auf Zuverlässigkeit zielenden Normung: DIN EN 54 Teil 1 bis 32 [7.50]; DIN VDE 0833 Teil 1, 2, und 4 [7.49] sowie der DIN 14675 [7.48] zum Aufbau und Betrieb von BMA. Sie kann durch bestimmte Maßnahmen weiter gesteigert werden:

- Zertifizierte Dienstleistungsmaßnahmen bei Planungen, Projektierungen, Errichtungen und Inbetriebnahmen von BMA (gemäß DIN 14675 [7.48]),
- Ausfallsichere, bidirektionale Vernetzung der Peripherieelemente,
- Ausfallsichere, bidirektionale Vernetzung der Brandmelderzentralen und der abgesetzten Bedieneinheiten,
- Automatische Selbstüberwachung aller Komponenten des Systems einmal pro Sekunde,
- Notredundanz unabhängig von den Basis-Rechner- und Softwareeinheiten,
- Redundanter Aufbau durch Doppelrechner in den diversen Baugruppen,
- Regelmäßige fachgerechte Instandhaltungsmaßnahmen,
- Rechtzeitige Modernisierung.

Anlagen die diese Anforderungen erfüllen und kompetent geplant und instand gehalten werden erreichen eine Zuverlässigkeit (Verfügbarkeit) von 99,91% [7.29], [7.30]. Die Stördauer rate liegt bei 8,07 h/a, die Versagenswahrscheinlichkeit beträgt

$$p_{f,BMA} = 0,00092.$$

Mögliche Ursachen, die zum Versagen einer automatischen Brandmeldeanlage im Brandfall führen können, sind in erster Linie

- mangelhafte Wartung \Rightarrow Human Error,
- falsche Auswahl der Sensorik auf Grund von Planungsfehlern oder nicht beachteter Nutzungsänderungen \Rightarrow Human Error,
- Ausfall der Vernetzung (z. B. Beschädigung der Leitungen),
- Änderung des Hardware-Verhaltens wegen langjährigen negativen Umgebungseinflüssen (dies zu erkennen und zu beheben gehört zur Instandhaltung) oder
- unzulässiger Betrieb der Anlage (z. B. Auflaufen der Alarme zu einer nicht besetzten Stelle) \Rightarrow Human Error.

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

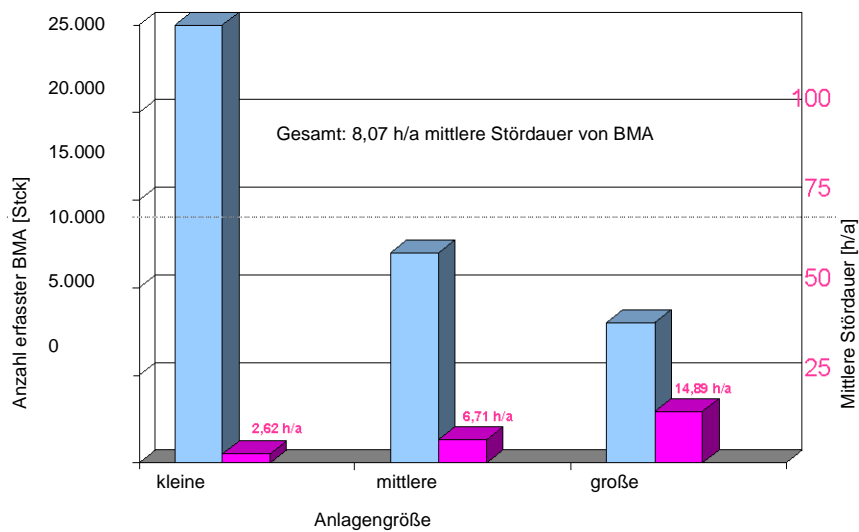


Bild 7.3 Umfrageergebnis zur Verfügbarkeit von BMA [7.11],[7.18]

An der Aufzählung wird deutlich, dass ein Großteil der Ursachen auf menschlichem Fehlverhalten (Human Error) beruhen. Der wiederkehrenden Prüfung von Brandmeldeanlagen kommt daher eine umso größere Bedeutung zu. Der Wahrscheinlichkeit des Anteils von Personal-

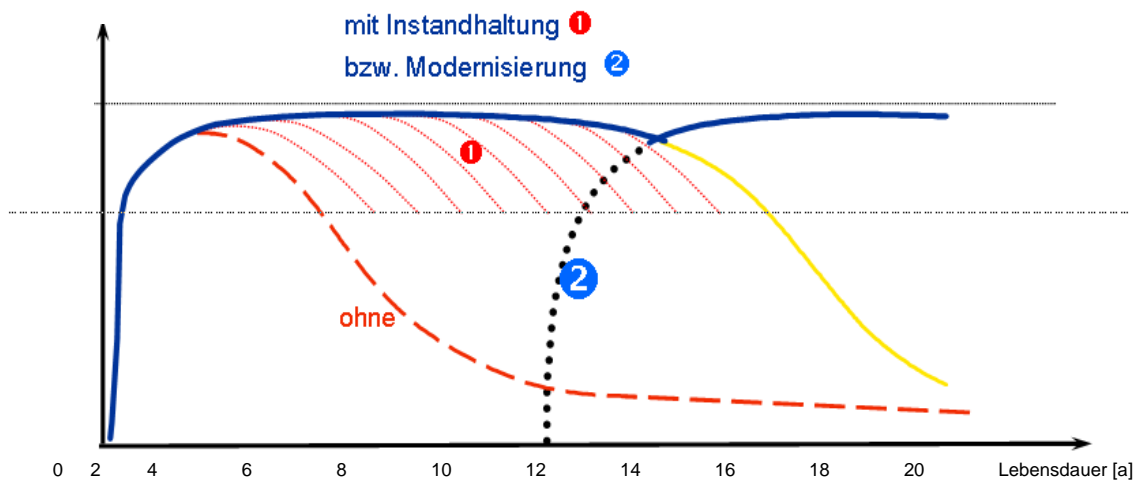


Bild 7.4 Zeitgerechte Instandhaltung und Modernisierung sind wesentlich verantwortlich für die Verfügbarkeit einer Brandmeldeanlage [7.11],[7.18]

handlungen (Human Error) durch die Produktion, zur Planung und zum Einbau derartiger Anlagen kann über umfangreiche Auswertungen für die Brandmelde – sowie Lösch- bzw. Brandbekämpfungsanlagen, in Abhängigkeit von der Handlungsart sowie der Fehlerquelle mit einer Fehlerrate von 0,02 (2%) bis zu 0,03 (3%) angegeben werden [7.32], [7.33], [7.34]. Konservativ kann daher in der Praxis von einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 2 bis 3% ausgegangen werden (siehe dazu auch 7.3.4 Zuverlässigkeit von Löschanlagen).

7.2.5 Wirksamkeit von Brandmeldeanlagen

Die Wirksamkeit von automatischen Brandmeldeanlagen (BMA) kann in Anlehnung an die Zielstellungen und gewünschte Wirkung auf das Brandszenario anhand verschiedener Schadenskriterien bemessen werden. Auf Grundlage der vfdb-Brandschadenstatistik (Phase I und II mit 5.016 Einsatzberichten von 28 Feuerwehren und insgesamt 1.216 echten Brandereignissen [7.62]) wurden Informationen über reale Gebäudebrände von der Brandentstehung und -ausbreitung, Alarmierung der Feuerwehr und den eingeleiteten (anlagentechnischen) Brandschutzmaßnahmen bis zu den Schäden erhoben (vgl. z. B. [7.38], [7.39], [7.40], [7.41], [7.42]). Damit lassen sich im Rahmen eines objektspezifischen Sicherheitskonzeptes quantitative Risikoanalysen durchführen. Typische Brandereignisse und Schadenbilder können hinsichtlich des notwendigen Einsatzes von Anlagentechnik wie auch des Einflusses der Anlagentechnik auf den Brandverlauf bewertet werden.

Der Anwender muss jedoch im Einzelfall prüfen, ob die Daten plausibel sind und eine Verwendung sinnvoll ist.

Tabelle 7.1 zeigt die ermittelten statistischen Auswirkungen auf die Brandschadenskriterien in Abhängigkeit des Alarmierungsweges [7.40], [7.62]. Aufgeführt ist die Alarmierung über das Telefon (Festnetz und Mobiltelefon zusammengenommen) im Vergleich zu den BMA. Es wird deutlich, dass bei der Alarmierung über Brandmeldeanlagen ein Brand deutlich geringere geschätzte Sachschäden zur Folge hat (in 84 % der Fälle ist der geschätzte Sachschaden kleiner 1.000 EUR) als bei der manuellen Alarmierung mit 68 %. Dieses Ergebnis ergibt sich, obwohl Gebäude die mit einer BMA ausgestattet sind i. d. R. über eine komplexere Bauweise und damit einhergehend über ein höheres Schadenspotenzial verfügen. Bei der automatischen Alarmierung war der Brand in 86 % der Fälle beim Eintreffen der Feuerwehr auf einen Gegenstand bzw. ein Gerät begrenzt. Dies traf bei der Alarmierung über das Telefon nur in 71 % zu [7.41]. Darüber hinaus zeigt sich bei den erfassten Bränden, dass sich der Rauch zum Eintreffzeitpunkt der Feuerwehr bei der Alarmierung über das Telefon verhältnismäßig weiter ausgebreitet hatte (in die Wohnung, den Treppenraum, Flur oder über mehrere Geschosse) als im Vergleich bei Alarmierung durch BMA [7.41]. Insbesondere waren dann auch die Flucht- und Rettungswege zum Eintreffzeitpunkt der Feuerwehr häufiger noch benutzbar (bei BMA in 80 % mit 160 von 202 Fällen), als wenn diese über das Telefon (59 %) alarmiert wurden. Die Art der Alarmierung wirkt sich ebenfalls auf den Löschwassereinsatz aus: So wurde bei der manuellen Alarmierung in 19 % der Fälle mehr als 500 Liter Löschwasser durch die Einsatzkräfte eingesetzt, wogegen bei der Alarmierung über Brandmeldeanlagen dies nur in 4 % der Fälle notwendig war. Dies zeigt, dass sich Brandmeldeanlagen positiv auf die Löschwassermenge und damit auch auf die Dauer des Feuerwehreinsatzes auswirken und so Löscharbeiten wirksamer unterstützen.

Die Wirksamkeit des Einsatzes von automatischen Brandmeldeanlagen lässt sich demzufolge statistisch anhand verschiedener Schadenskriterien nachweisen. Ein positiver Einfluss auf den Brandverlauf ist qualifizierbar und quantifizierbar.

Tabelle 7.1 Auswertung von Brandschadenskriterien bei der Alarmierung der Feuerwehr über automatische Brandmeldeanlagen (BMA) im Brandfall im Vergleich zu manuellen Telefonanrufen (Festnetz- und Mobilfunktelefone) (Quelle: vfdb-Brandschadenstatistik [7.62]; Phase I und II mit 5.016 Gebäudebrandeinsätzen von 28 Feuerwehren, inkl. 1.216 tatsächlichen Bränden; vgl. [7.38], [7.39] und [7.41])

Erfassungskriterium		Alarmierung		Anteil	
		BMA [Anzahl]	Telefon [Anzahl]	BMA [%]	Telefon [%]
Sachschaden	< 1.000 EUR	134	544	84	68
	< 10.000 EUR	21	158	13	20
	< 100.000 EUR	5	83	3	10
	< 500.000 EUR	0	10	0	1
	< 1.000.000 EUR	0	2	0	0
	> 1.000.000 EUR	0	3	0	0
	Keine Angabe möglich	23	85	---	---
Summe		183	885	100	100
Brandausmaß	Gegenstand	171	655	86	71
	Raum	19	166	10	18
	Mehrere Räume	4	31	2	3
	Wohnung	0	13	0	1
	Geschoss	2	16	1	2
	Mehrere Geschosse	0	10	0	1
	Brandabschnitt	0	9	0	1
	Mehrere Brandabschnitte	0	4	0	0
	Treppenraum	2	4	1	0
	Gesamtgebäude	0	15	0	2
	Weitere Gebäude	0	2	0	0
	Summe		198	925	100
Rauchausbreitung	Nicht nennenswert	95	410	47	42
	Raum, Schacht	60	158	30	16
	Wohnung	21	186	10	19
	Geschoss	8	61	4	6
	Treppenraum	6	80	3	8
	Flur	9	37	4	4
	Mehrere Geschosse	3	53	1	5
	Summe		202	985	100
Rauchschichtung erkennbar		25	172	---	---
Rettungsweg benutzbar		160	585	---	---
LW-Einsatz	Kein Löschwasser	133	312	71	34
	< 500 L	48	425	26	47
	< 2500 L	5	117	3	13
	> 2500 L	2	53	1	6
	Summe		188	907	100

Werden die ermittelten statistischen Auswirkungen und die Brandschadenskriterien in Abhängigkeit der ausgelösten Anlagentechnik gegenübergestellt, ergibt sich Tabelle 7.2. Verglichen werden hier Brandfälle, bei denen automatische Brandmeldeanlagen ausgelöst haben, mit

Bränden bei denen keine Anlagentechnik im Gebäude vorhanden war. Tabelle 7.2 zeigt anhand der ausgelösten Anlagentechnik (BMA) über alle Schadenskriterien ein vergleichbares Bild zu dem Ergebnis in Bezug auf die Art der Alarmierung in Tabelle 7.2.

Tabelle 7.2 Auswertung von Brandschadenskriterien bei der Auslösung von automatischen Brandmeldeanlagen (BMA) im Brandfall im Vergleich zu Einsätzen bei denen keine Anlagentechnik vorhanden war (Quelle: vfdb-Brandschadenstatistik [7.62]; Phase I und II mit 5.016 Gebäudebrandeinsätzen von 28 Feuerwehren, inkl. 1.216 tatsächlichen Bränden; vgl. [7.38], [7.39] und [7.41])

Erfassungskriterium		Ausgelöst		Anteil	
		BMA [Anzahl]	"keine Anlagentechnik" [Anzahl]	BMA [%]	"keine Anlagentechnik" [%]
Sachschaden	< 1.000 EUR	128	452	83	69
	< 10.000 EUR	22	132	14	20
	< 100.000 EUR	5	59	3	9
	< 500.000 EUR	0	10	0	2
	< 1.000.000 EUR	0	1	0	0
	> 1.000.000 EUR	0	1	0	0
	Keine Angabe möglich	23	76	---	---
	Summe	178	731	100	100
Brandausmaß	Gegenstand	166	534	85	71
	Raum	20	133	10	18
	Mehrere Räume	5	22	3	3
	Wohnung	0	9	0	1
	Geschoss	2	14	1	2
	Mehrere Geschosse	0	7	0	1
	Brandabschnitt	0	8	0	1
	Mehrere Brandabschnitte	0	2	0	0
	Treppenraum	2	3	1	0
	Gesamtgebäude	0	13	0	2
	Weitere Gebäude	0	2	0	0
	Summe	195	747	100	100
	Rauchausbreitung	Nicht nennenswert	92	374	46
Raum, Schacht		56	117	28	15
Wohnung		23	119	12	15
Geschoss		8	54	4	7
Treppenraum		7	48	4	6
Flur		7	25	4	3
Mehrere Geschosse		5	37	3	5
Summe		198	774	100	100
Rauchsichtung erkennbar		20	158	---	---
Rettungsweg erkennbar	156	446	---	---	
LW-Einsatz	Kein Löschwasser	127	216	69	29
	< 500 L	45	375	25	51
	< 2500 L	7	105	4	14
	> 2500 L	4	45	2	6
	Summe	183	741	100	100

7.2.6 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Brandmeldeanlagen

Wie in Abschnitt 7.1 angedeutet, lässt sich die Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Brandmeldeanlagen mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeitsberechnung genauer untersuchen [7.5](vgl. Kapitel 10).

Im Folgenden werden in den bauaufsichtlichen Verordnungen und Richtlinien mit Stand 2020 verankerte Regelungen aufgeführt, bei denen eine Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Brandmeldeanlagen ermöglicht wird. Dabei ist zu bedenken, dass in vielen Fällen die Kompensation einer baulichen Brandschutzmaßnahme nur durch ein Paket mehrerer anlagentechnischer Komponenten möglich ist. So sind z. B. Beherbergungsstätten mit mehr als 60 Betten nicht allein wegen des Vorhandenseins einer BMA zulässig, sondern es müssen zwei bauliche Rettungswege vorhanden sein. Ähnlich verhält es sich mit anderen Sonderbauten, bei denen eine Erweiterung des Nutzungsbereiches zusätzliche Maßnahmen als Paket erfordert. Bei der Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch eine BMA ist zu beachten, dass die Rettungswege auch Angriffswege der Feuerwehr darstellen.

Beispielhaft soll die Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch BMA anhand der Muster-Industriebaurichtlinie verdeutlicht werden. Demnach darf die zulässige Rettungsweglänge beim Vorhandensein einer BMA mit zusätzlicher Alarmierungseinrichtung in Abhängigkeit von der lichten Raumhöhe erhöht werden:

- von 35 m auf maximal 50 m bzw.
- von 50 m auf maximal 70 m bei einer Raumhöhe von mind. 5 m.

7.3 Löschanlagen

7.3.1 Allgemeines

Die Aufgabe von Lösch- und Brandbekämpfungsanlagen besteht einerseits darin, das Ausmaß eines Brandes bis zum Eintreffen der Feuerwehr wirksam zu begrenzen, damit eine eigensichere Brandbekämpfung bei erhöhten Brandrisiken zu ermöglichen, und andererseits die Brandbekämpfung für den Fall sicherzustellen, dass ein rechtzeitiges Eingreifen der Feuerwehr aufgrund einer schnellen Brandausbreitung, eines langen Anfahrtsweges oder erschwerter Zugänglichkeit zum Brandort nicht zu erwarten ist.

Sauerstoffreduzierungsanlagen sind keine Lösch- oder Brandbekämpfungsanlagen, sie haben die Aufgabe, durch Hinzugabe von Stickstoff in die Raumluft die Entstehung bzw. Ausbreitung von Flammen im Schutzbereich zu verhindern. Sauerstoffreduzierungsanlagen dienen dem vorbeugenden Brandschutz, sie vermeiden Brände.

7.3.2 Arten von Löschanlagen

7.3.2.1 Allgemeines

Folgende stationäre sowie halbstationäre Lösch- und Brandbekämpfungsanlagen werden in der Praxis, in Industrie- und Gewerbe und in anderen Sonderbauten eingesetzt:

- Wasserlöschanlagen
- Sprinkleranlagen,

- Sprühwasserlöschanlagen,
- Wassernebel-Löschanlagen (Ein- und Zweistoffstofftechnologie),
- Schaumlöschanlagen,
- Gaslöschanlagen
- CO₂-Löschanlagen,
- Inertgas-/Inertgasgemisch-Löschanlagen,
- Löschanlagen mit halogenierten Kohlenwasserstoffen (Hinweis: Auslegung erfolgt als Gaslöschanlage, aber Löscheffekt ist vorrangig der Inhibitionseffekt),
- Pulverlöschanlagen.

Unterscheidet man die Löschanlagen nach dem eingesetzten Löschmittel kommen hauptsächlich Wasserlöschanlagen, und hier Wassernebel-Löschanlagen und Sprinkleranlagen, zum Einsatz.

7.3.2.2 Wassernebellöschanlagen (Einstofftechnologie)

Bei Wassernebel-Löschanlagen unterscheidet man unterschiedliche Wassernebel-Technologien. Die Erfahrungen aus Brandversuchen sind noch nicht sehr umfangreich, wie bei klassischen Sprinkleranlagen, so dass Abweichungen von der Planungsgrundlage schwieriger beurteilt werden können. Dies bedeutet gleichzeitig, dass eine noch sorgfältigere Planung notwendig ist, als bei klassischen Sprinkleranlagen. Als technische Regelwerke stehen

- VdS 3188 - Wassernebel-Sprinkleranlagen und Wassernebel-Löschanlagen (Hochdruck-Systeme), Planung und Einbau,
- VdS 2562 - Verfahren für die Anerkennung neuer Löschtechniken,
- VdS 3115 - Verfahren für die Anerkennung von neuen Schutzkonzepten,
- bvfa Merkblatt Wassernebel-Löschanlagen,
- NFPA 750 - Standard on Water Mist Fire Protection Systems,

zur Verfügung.

Für Wassernebel-Löschanlagen existieren im Gegensatz zu anderen Löschanlagen (z. B. Sprinkleranlagen) keine allgemein gültigen Auslegungskriterien. Daher werden diese Anlagen herstellerspezifisch entwickelt und passend für das jeweils zu schützende Objekt ausgelegt. Die verwendeten Bauteile sind untereinander nicht austauschbar. Die Auslegungsparameter eines Systems sind nicht auf Systeme anderer Hersteller übertragbar. Für den jeweiligen Anwendungsbereich müssen unabhängig bestätigte Wirksamkeitsnachweise vorliegen (z. B. VdS Schadenverhütung oder FM-Global).

Aufgrund der kleinen Tropfen ist Wassernebel deutlich anfälliger in Bezug auf Thermik und Luftströmungen. Wo ein Sprinklertropfen durch den thermischen Auftrieb eines Brandes hindurch nach unten fällt, kann ein Wassernebel so abgelenkt werden, dass keine wirksame Brandbekämpfung am Brandherd erfolgt.

„Wassernebel“ wird im internationalen Sprachgebrauch als „water mist“ und in Deutschland auch als Feinsprühtechnik bezeichnet. Als Wassernebel bezeichnet man Löschwasser, welches in Tropfendurchmesser kleiner 1 mm ausgebracht wird. „HDWN“ ist als Abkürzung für „Hochdruck-Wassernebel“ gebräuchlich. Die Einstufung der Löschsyste me erfolgt wie folgt über den Anlagenbetriebsdruck:

- CEN/TS 14972:2008
 - Niederdruck < 12,5 bar (low pressure),
 - Mitteldruck > 12,5 und < 35 bar (medium pressure),
 - Hochdruck > 35 bar (high pressure).
- nach VdS 3188
 - Niederdruck bis 16 bar (Feinsprüh),
 - Hochdruck über 16 bar (Wassernebel).

Bei der Anlagengestaltung wird analog zu Sprühwasserlösch- und Sprinkleranlagen zwischen offenen (Wassernebel-Löschanlagen) und geschlossenen (Wassernebel-Sprinkleranlagen) Rohrsystemen unterschieden.

Um den erforderlichen Druck für den Wassernebel zu erzeugen, gibt es unterschiedliche technische Möglichkeiten:

- Zylindersysteme:
Druckbehälter mit begrenzter Wassermenge, bei denen das Löschwasser durch ein Treibgas unter Druck ausgebracht wird.
- Pumpensystemen:
Der Druck wird mittels Pumpe(n) erzeugt. Die Pumpen werden z. B. durch Elektro- oder Dieselmotoren angetrieben.
- Druckluft-Pumpen:
Bei dieser Sonderform der Pumpensysteme wird die Hochdruckpumpe durch in Flaschen gespeicherte Druckluft angetrieben. Dabei muss die Druckluft so bemessen sein, dass die Pumpe(n) mindestens die doppelte Betriebszeit aus der im Brandversuche ermittelten Löschezit aufweisen.

Ein Wassernebelsystem liegt nicht vor, wenn der Haupt-Löscheffekt durch Löschgase erfolgt und das Wasser nur zur Kühlung beigemischt wird (Zweistoffsysteme als Gas-Wasser-Löschanlagen).

Bei der Auslösung unterscheidet man wie bei klassischen Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen

- Wassernebel-Sprinkler mit thermischem Auslöseelement (Glasampulle oder Schmelzlotelement) und
- offene Wassernebel-Düsen.

Des Weiteren unterscheidet man bei offenen Systemen folgende Auslösemechanismen:

- Elektronische Auslösung:

- Automatisch durch Detektionselemente über Brandmeldeanlage/Löschsteuerzentrale oder
- durch Handtaster über Brandmeldeanlage/Löschsteuerzentrale.
- Pneumatisch/hydraulische Auslösung:
 - Automatisch durch Anregersysteme mit thermischen Detektionselementen.

7.3.2.3 Sprinkleranlagen

Sprinkleranlagen sind in der Praxis am häufigsten anzutreffen, was einerseits mit ihrer Effizienz und andererseits mit der nachgewiesenen Zuverlässigkeit zu erklären ist. Es werden folgende Typen von Sprinkleranlagen unterschieden:

- Nassanlage,
- Trockenanlage,
- Nass-Trockenanlage,
- Vorgesteuerte Anlage,
- Tandemanlage.

Tabelle 7.3 zeigt die Sprinklertypen, ihre Wasserverteilung, den Schutzzumfang und die Eignung.

Tabelle 7.3 Sprinklertypen (Anmerkung: LH = light hazard, (Nutzungen mit kleiner Brandgefahr); OH1 = ordinary hazard, group 1, (Nutzungen mit mittlerer Brandgefahr Gruppe 1 nach VdS CEA 4001 [7.12]))

Sprinklertyp	Montageart	Wasserverteilung	nominelle Schutzfläche	besonders geeignet für
Normalsprinkler	hängend und stehend	kugelförmig	9 - 21 m ²	brennbare Decken
Schirmsprinkler	hängend und stehend	paraboloidförmig zum Boden gerichtet	9 - 21 m ²	-
Flachschirmsprinkler	hängend und stehend	flach paraboloidförmig	gilt nicht für Regalschutz	Hohlraumschutz Rasterdecken
Seitenwandsprinkler	stehend	einseitig paraboloidförmig	12 - 21 m ²	geringe Raumhöhe LH / OH 1
Horizontale Seitenwandsprinkler	horizontal	vergrößerte Wurfweite	12 - 21 m ²	LH / OH 1
ESFR-Sprinkler	hängend und stehend	Paraboloidförmig zum Boden gerichtet	max. 9 m ²	hohe Räume

Die Auslegung einer Sprinkleranlage erfolgt nach VdS CEA 4001 [7.12] und wird in sechs Schritten durchgeführt:

1. Festlegung der Brandgefahrenklasse,
2. Bestimmung der Anlagenart,
3. Festlegung von Wirkfläche, Wasserbeaufschlagung, Mindestbetriebszeit und Schutzfläche (Kennwerte für Planung und Einbau),
4. Auswahl von geeigneten Sprinklerdüsen (Tabelle 7.3 zeigt die Sprinklertypen, ihre Wasserverteilung, den Schutzbereich und die Eignung),
5. Dimensionierung der Wasserversorgung (hydraulische Berechnung),
6. Bemessung der Energieversorgung.

7.3.3 Wirkung von Löschanlagen auf das Brandszenario

Da belastbare statistische Daten zur Wirksamkeit und Zuverlässigkeit manuell ausgelöster (halbautomatischer) Löschanlagen derzeit nicht verfügbar sind, konzentrieren sich die nachfolgenden Ausführungen auf automatische sowie stationäre oder selbsttätige Feuerlöschanlagen und insbesondere auf Sprinkleranlagen, zu denen die umfangreichsten Erfahrungswerte vorliegen.

Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrates bei Bränden, die durch die Wirkung einer entsprechend zu dimensionierenden automatischen oder selbsttätigen Löschanlage gemäß dem gewählten Schutzziel und Schutzbereich beeinflusst wird, hängt in erster Linie von folgenden Parametern ab:

- Brandverlauf in der Entstehungsbrandphase (Art, Anordnung, Brandentwicklungszeit t_{α}),
- Ansprechempfindlichkeit (Abstand) der Verschlusselemente Sprinklerdüse oder Auslöseelemente (Response-Time-Index RTI) bzw. der Brandmelder zur Ansteuerung der Löschanlage und damit Auslösezeitpunkt der Anlage,
- Bauliche und technologische Besonderheiten (Raumhöhe, Raumdichtigkeit bzw. -umfang bei Gaslöschanlagen),
- Lüftungsverhältnisse,
- Chemische und physikalische Eigenschaften der Brandstoffe,
- Düsenanordnung und Einordnung im Löschbereich (Anwendungs- und Leistungscharakteristik),
- Wirksamkeit der Löschmittelbeaufschlagung (Brandstoffoberfläche, Reaktionszone der Flamme).

Grundsätzlich wird angenommen, dass die Anlagen – sofern sie nach anerkannten Regeln der Technik bemessen, installiert und betrieben werden – in der Entstehungsbrandphase, hier speziell in den Phasen „selbstständiges Brennen“, „kräftiges Brennen“ und „sich ausbreitender

Brand“ auslösen, bevor die Phase des Feuerübersprungs (Flashover) erreicht wurde und der Brand ventilations- oder brandlastgesteuert verläuft (Bild 7.5).

Ein Maß für die Ansprechempfindlichkeit von Sprinklern ist der Response-Time-Index (RTI-Wert). Je kleiner der RTI-Wert, desto schneller löst bei vergleichbarer Wärmebeaufschlagung der Sprinklerverschluss (Glassfuss oder Schmelzlot) aus (Tabelle 7.4).

Tabelle 7.4 Ansprechempfindlichkeit von Sprinklern

Ansprechempfindlichkeitsklasse	Response-Time-Index [(ms) ^{0,5}]
standard	> 80 ≤ 200
spezial	50 bis 80
schnell	< 50

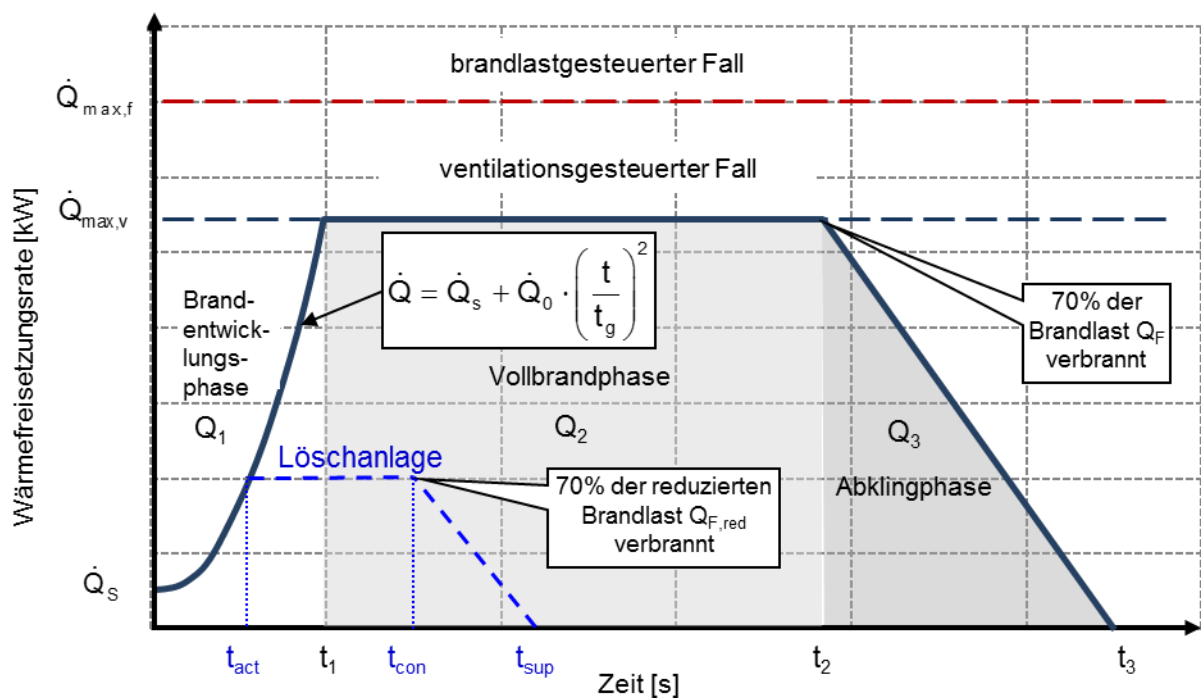


Bild 7.5 Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bei Begrenzung durch Brandlast, Ventilation oder Löschanlagen. Zum Zeitpunkt t_2 sind 70 % der Brandlasten verbraucht und die Abklingphase beginnt.

Weiterhin wird der Auslösezeitpunkt von der radialen Entfernung der Sprinkler-Achse von der Plume-Achse beeinflusst. Um die Wirkung der Sprinkler auf den Brandverlauf zu quantifizieren, müssen deren Auslösezeiten in Abhängigkeit der Brandausbreitung, der Gebäudehöhe, der Empfindlichkeit des Auslöseelementes und des Abstandes von der Plume-Achse bestimmt werden. Dabei ist zu bedenken, dass ein Brand mittig unter einem Sprinkler im Hinblick auf den Löscherfolg aufgrund der Schutzflächenüberschneidungen als eine ungünstigere Variante einzustufen ist als der Löscherfolg bei dem gleichen Brand *zwischen* zwei Sprinklern, wenn *beide* Sprinkler auslösen.

So kann z. B. für Anordnungshöhen der Sprinklerdüsen bis 7 m unter Berücksichtigung des Einflusses von natürlichen sowie maschinellen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen angegeben werden, dass ab Wärmefreisetzungen von 300 kW erste Sprinkler in der unmittelbaren Nähe einer Wärmequelle auslösen. Erst über 400 kW / 600 kW werden weitere Sprinkler in der näheren und weiteren Umgebung zum Brandherd (Umkreis 3,75 m, 3 m x 3 m Schutzfläche mit Diagonale ca. 2,1 m) mit Streubreiten der Auslösezeit von 2 bis 6 min geöffnet [7.35].

Gemäß [7.13] kann vereinfacht angenommen werden, dass die Wärmefreisetzungsrate nach Auslösen der Sprinkler (t_{act}) noch 5 Minuten konstant weiter verläuft (t_{con}) und dann über einen Zeitraum von 25 Minuten linear bis auf null (t_{sup}) abnimmt. Die lineare Abnahme der Wärmefreisetzungsrate in der Abklingphase stellt eine rechentechnische Vereinfachung dar. In der Realität ergibt sich analog zur Brandentwicklungsphase ein konkaver Kurvenverlauf (vgl. Bild 4.1 in Kapitel 4).

Die Zeitdauer bis zur Brandkontrolle/Brandunterdrückung wird für jede Wärmefreisetzungsrate \dot{Q}_{LK} gleich angenommen mit der Begründung, dass bei größerer Brandfläche auch eine größere Anzahl von Sprinklern auslöst. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Fließdruck auch bei Einsatz mehrerer Sprinkler nicht zu stark absinkt (Auslegung der Anlage).

Der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate ergibt sich folgendermaßen (siehe [7.4]):

$$0 - t_{act}: \quad \dot{Q}(t) = \left(\frac{t}{t_{\alpha}} \right)^2 \quad [MW] \quad (7.1)$$

$$t_{act} - t_{con}: \quad \dot{Q}(t) = \dot{Q}_{LK} \quad [MW] \quad (7.2)$$

$$t_{con} - t_{sup}: \quad \dot{Q}(t) = \frac{\dot{Q}_{LK}}{t_{sup} - t_{con}} \cdot (t_{sup} - t) \quad [MW] \quad (7.3)$$

mit

- t_{act} Sprinklerauslösezeit [s],
- t_{con} Zeitpunkt des Beginns der Brandkontrolle durch die Feuerwehr [s],
- t_{sup} Zeitpunkt der Brandeindämmung [s],
- \dot{Q}_{LK} Maximum der Wärmefreisetzungsrate bei Brandkontrolle durch die Löschanlage [MW].

Bild 7.6 zeigt beispielhaft den auf dieser Grundlage ermittelten Brandverlauf bei einer Brandentwicklungszeit von 150 s, einer Raumhöhe von 6 m, einem radialen Abstand der Sprinklern von der Plume-Achse von 2,8 m und einem RTI-Wert von $80 \text{ (ms)}^{0,5}$.

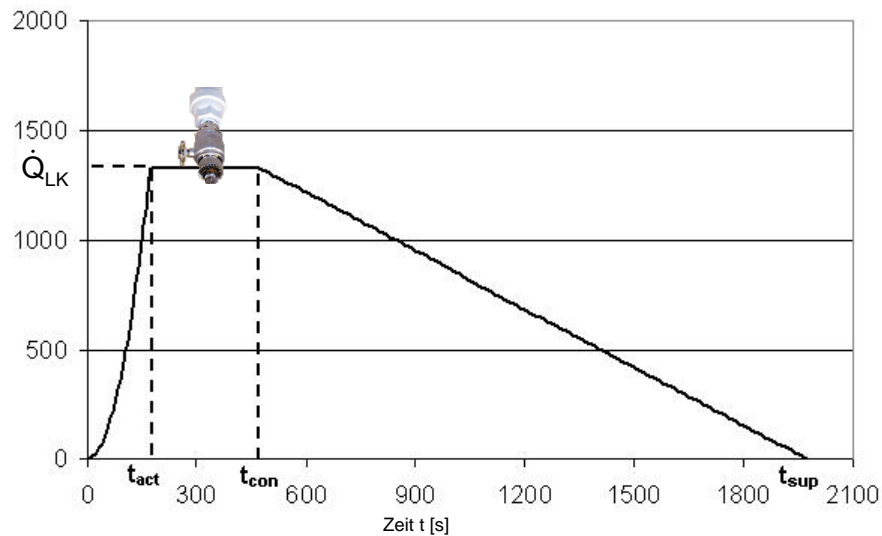


Bild 7.6 Beispiel für Brandverlauf in Form des Verlaufes der Wärmefreisetzungsrate bei Einsatz einer Sprinkleranlage (alle Modellgrößen mit ihren Nennwerten eingesetzt)

Ein Näherungsansatz für die mathematische Beschreibung der Brandentwicklung unter dem Einfluss von Sprinkleranlagen wurde in den USA entwickelt [7.19], [7.20]. Der Algorithmus beschreibt die Wirkung des Sprinklerwassers auf die Wärmefreisetzungsrate eines Brandherdes mit Gleichung (7.4):

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}(t_{\text{act}}) \cdot \exp\left[-\frac{(t - t_{\text{act}})}{3,0 \cdot w^{-1,85}}\right] \quad \text{in kW/m}^2 \quad (7.4)$$

für $t \geq t_{\text{act}}$

mit

$\dot{Q}(t)$ Wärmefreisetzungsrate unter Sprinklerschutz in kW,

t Zeit seit Brandbeginn in s,

t_{act} Zeitpunkt ab Brandbeginn, zu dem die erste Sprinklerdüse öffnet in s,

$\dot{Q}(t_{\text{act}})$ Wärmefreisetzungsrate beim Öffnen der ersten Sprinklerdüse (t_{act}) in kW,

w spezifische Wasserbeaufschlagung der Sprinkleranlage in mm/s.
($\geq 0,07$ mm/s)

Bild 7.7 zeigt exemplarisch die Abnahme der Wärmefreisetzungsrate für eine Wärmefreisetzungsrate beim Öffnen der ersten Sprinklerdüse von $\dot{Q}(t_{\text{act}}) = 500$ kW.

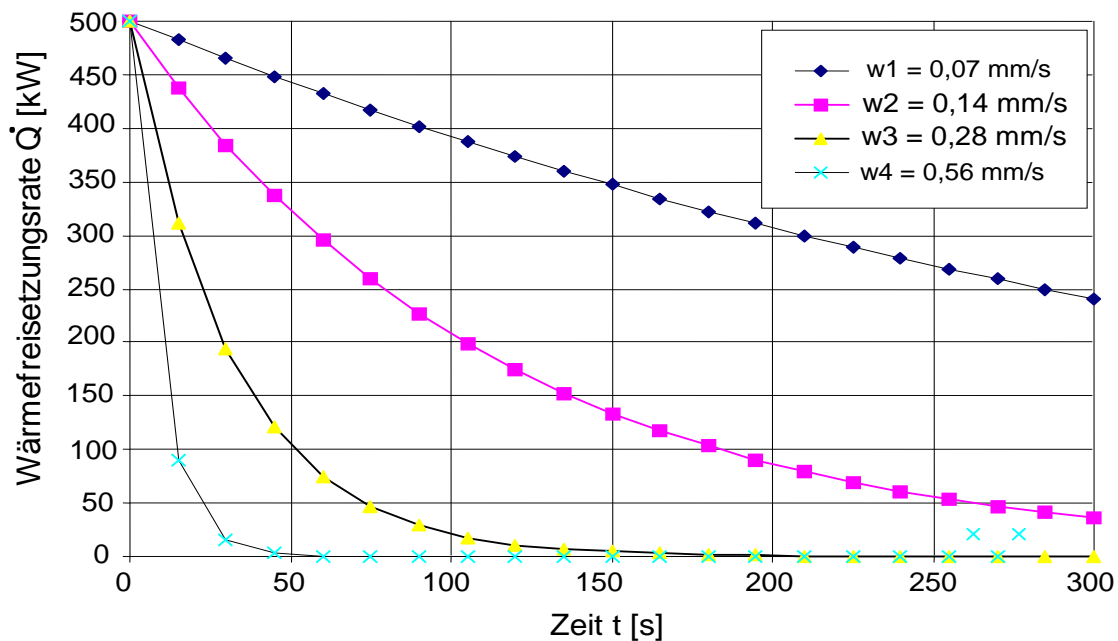


Bild 7.7 Einfluss der Sprinklerwirkung auf die Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Wasserbeaufschlagung und der Löschdauer

Wegen der Ungewissheit der Einsatzgrenzen dieses Algorithmus, sollte nach Fleming [7.21] seine Anwendung auf „leichte Risiken“ [7.22] mit langsamer bis mittlerer Brandentwicklung beschränkt sein. Besonderheiten aus dem aufeinanderfolgenden Auslösen mehrerer Sprinkler sind bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Die Brandlasten müssen sich mindestens so gut löschen lassen wie Holzkrippen.

Spezielle Berechnungen, z. B. für besondere Raum- bzw. Brandgutkonfigurationen, können mit Brandsimulationsmodellen vorgenommen werden. Diese Modelle gestatten den Ansatz mehrerer Sprinkler und können die Wechselwirkung zwischen Brand- und Sprinklerwirkung darstellen. Eine abschließende Validierung dieser Sprinkler-Modelle steht jedoch noch aus (s. Kap. 5.6.6).

7.3.4 Zuverlässigkeit von Löschanlagen

Umfangreiche Daten zur Zuverlässigkeit von selbsttätigen Löschanlagen liegen bei den Sachversicherern vor. Wegen der großen Bedeutung der Sprinkleranlagen für die Praxis wurden primär die statistische Daten des VdS [7.14] für Sprinkleranlagen ausgewertet und mit internationalen Erhebungen (z. B. Australien) verglichen. Zusätzlich wurden unabhängig voneinander erfragte Expertenaussagen herangezogen, z. B. vom Bundesverband Feuerlöschgeräte und Anlagen (BVFA). Die Ergebnisse dieser Recherche sind in Tabelle 7.5 zusammengestellt.

Als Versagen der Sprinkleranlage wurde im Rahmen der Statistik sowohl der Fall betrachtet, dass die Anlage infolge technischen Versagens nicht ausgelöst hat, als auch der Fall, dass die Anlage zwar ausgelöst hat, die Wirkfläche jedoch überschritten wurde.

Tabelle 7.5 Versagenswahrscheinlichkeit von Sprinkleranlagen aus verschiedenen Quellen

Quelle	Versagenswahrscheinlichkeit p pro Anforderung
VdS Schadenverhütung [7.14]	0,019
Australien [7.15]	0,041
Expertenaussagen BVFA	0,020

Zum technischen Ausfall der Löschwirkung einer Sprinkleranlage führen die folgenden Umstände infolge mangelnder Wartung, Materialfehlern oder menschlichen Fehlverhaltens:

- Druckluftwasser als erschöpfliche Wasserzufuhr
 - Wasserfüllung unzureichend,
 - kein Wasser im Behälter,
 - Druck des Behälters unzureichend,
 - Defekt in den Nachfülleinrichtungen für Luft und Wasser,
- Wasserleitung als unerschöpfliche Wasserzufuhr
 - unzureichende Leistungsfähigkeit,
 - Absperrschieber geschlossen,
 - keine Einspeisung in den Zwischenbehälter wegen technischen Versagens der Schwimmerventile,
 - Zwischenbehälter ohne Löschwasser,
 - unzureichende Nachfüllung des Zwischenbehälters wegen teilweise geschlossener Schieber bzw. wegen Verunreinigung der Steinfänger,
- Pumpen als unerschöpfliche Wasserzufuhr
 - Absperrschieber geschlossen,
 - Ausfall des automatischen Pumpenanlaufs wegen Defekt eines Kontaktschalters,
 - Ausfall der Pumpenanlage wegen technischer Störung im Schalterschrank,
 - Ausfall der Startautomatik des Dieselmotors,
- Mängel an Ventilstationen
 - Absperrschieber geschlossen,
 - Trockenventilrohrnetze mit Wasser gefüllt,
 - Schnellöffner außer Betrieb,
- sonstige Mängel
 - Alarmabstellhahn geschlossen,
 - für neue Nutzung unzureichende Wasserleitung der Sprinkleranlage,

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

- Behinderung der Wasserleitung von Sprinklern,
- ungeeignetes Löschmittel.

Weitere Ursachen für das Versagen der Komponente Sprinkler sind mangelhafte Auslegung und Sabotage. Im Rahmen einer vom VdS im Auftrage des europäischen Komitees der Versicherer (CEA) erstellten Sprinklerstatistik wurden 7.047 Fälle von Bränden und Leckagen aus ganz Europa ausgewertet. Der Zeitraum der Statistik erstreckt sich von 1985 bis 2002. Als Ergebnis dieser statistischen Auswertungen wurden die Ursachen des Versagens prozentual erfasst (Bild 7.8).

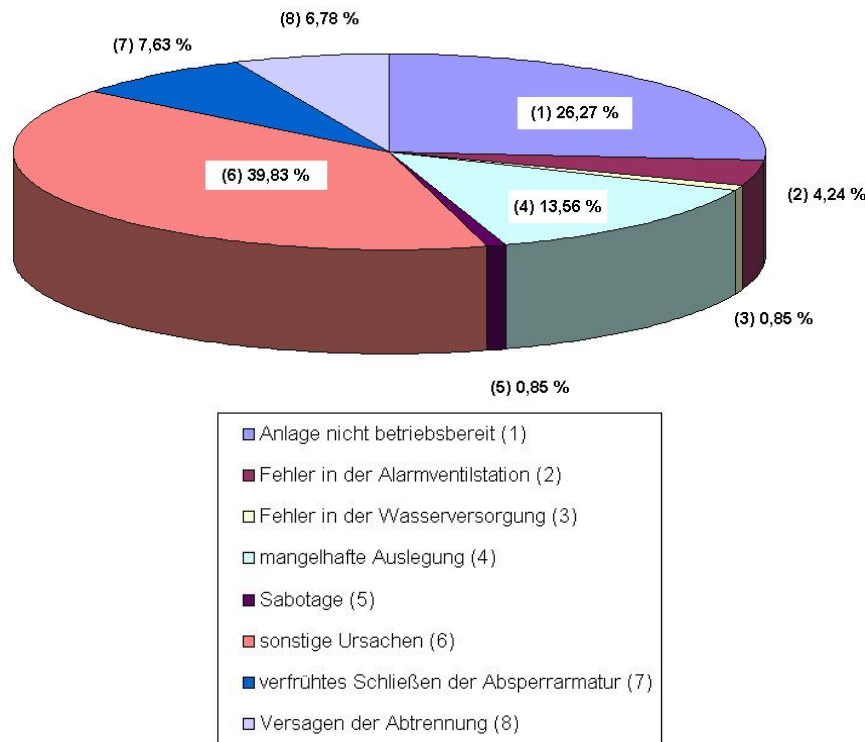


Bild 7.8 Prozentualer Anteil der Ursachen für das Versagen von Sprinkleranlagen

In Anbetracht dessen, dass internationalen Standards bezüglich Errichtung und Wartung von Sprinkleranlagen ggf. weniger streng sind als die Auflagen des VdS und weil die auf Grundlage von Statistiken ermittelten Werte eher konservativ sind, wird folgender Wert für die Versagenswahrscheinlichkeit von Sprinkleranlagen im Anforderungsfall angenommen:

$$p_{f, \text{Sprinkler}} = 0,02.$$

7.3.5 Wirksamkeit von Löschanlagen

Vergleichbar zur Wirksamkeit der Brandmeldeanlagen (siehe Kapitel 7.2.5) kann die Wirksamkeit von Feuerlöschanlagen (FLA) auf Grundlage der vfdb-Brandschadenstatistik [7.62] analysiert werden. Ausgangspunkt der Erhebung sind, wie in Kapitel 7.2.5 bereits erläutert, derzeit 5.016 Einsatzberichte von Gebäudebränden in Deutschland von 28 Feuerwehren mit insgesamt 1.216 echten Bränden (Phase I und II, vgl. z. B. [7.38], [7.39], [7.40], [7.41], [7.42]). Die Fallzahlen der vfdb-Brandschadenstatistik sind hinsichtlich der Brände in Gebäuden mit FLA gering: Von den 5.016 erfassten Gebäudebrandeinsätzen liegen in 128 Fällen Angaben zu FLA vor, wobei nur zu maximal 12 echten Bränden auch differenziertere Angaben zu den

Schadenskriterien vorliegen – mit einer Mehrfachnennung zum Brandausmaß. Die Wirksamkeitsnachweise sind statistisch demzufolge bislang nicht belastbar.

Die erhobenen Daten zur Entstehung und Ausbreitung der Brände sowie zu den entstandenen Schäden und eingeleiteten Brandschutzmaßnahmen bei realen Brandeinsätzen ermöglichen noch keine abschließende Beurteilung der Effektivität des Einsatzes von FLA und deren Wirkung auf den Brandverlauf. Diese Informationen können ggf. im Einzelfall für quantitative Risikoanalysen für objektspezifische Sicherheitskonzepte genutzt werden. Der Anwender muss jedoch im Einzelfall prüfen, ob die Daten plausibel sind und eine Verwendung sinnvoll ist. Insbesondere sind die folgenden Aspekte, die nicht durch die vfdb-Brandschadenstatistik erhoben werden, zu berücksichtigen:

- FLA werden generell in Gebäuden mit einer höheren Wertekonzentration und/oder Brandlast eingesetzt. Somit ist in Objekten mit FLA das Schadenspotential in der Regel um ein Vielfaches größer als bspw. in Einfamilienhäusern.
- Die Statistik gibt keine Informationen zu Auslegungskriterien oder Schutzziele der FLA. Bspw. werden Sprinkleranlagen auch zur Kompensation von Abweichungen im baulichen Brandschutz eingesetzt. Schutzziel kann die Verstärkung einer Brandwand sein und nicht primär die Brandbekämpfung innerhalb eines Brandabschnittes.
- Auch ist nicht bekannt, nach welcher Norm/Richtlinie die FLA geplant und errichtet wurde.

Das Ergebnis der Auswertung der Brandschadenskriterien bei Auslösung von FLA im Vergleich mit Bränden, bei denen keine Anlagentechnik im Gebäude vorhanden war, ist in Tabelle 7.6 dargestellt (vergleichbar zu der Auswertung der Brandmeldeanlagen in Tabelle 7.2). Aufgrund der geringen Fallzahlen wurde mangels Aussagekraft auf eine Darstellung der Prozentwerte verzichtet.

Es zeigt sich, dass bei den Gebäudebrandeinsätzen in denen Anlagentechnik vorhanden war, in keinem Fall der Sachschaden größer als 100.000 EUR war. Aufgrund der hohen Wertekonzentration in Objekten mit FLA ist davon auszugehen, dass der verhinderte Sachschaden bei Bränden mit FLA deutlich höher war, als bei Objekten ohne FLA. Die Brandausbreitung hat sich in keinem Fall, bei dem eine FLA vorhanden war, auf den gesamten Brandabschnitt ausgedehnt. Dem gegenüber hat sich in 32 von 747 Fällen ohne FLA der Brand auf mindestens den gesamten Brandabschnitt oder mehrere Etagen ausgedehnt. Bei der Rauchausbreitung zeigt sich, dass bei 10 von 12 der Brände mit FLA diese sich auf eine Wohnung beschränkte. Der Rauch hat sich bei Vorhandensein von FLA in 16 % der Fälle über eine Wohnung auf das Geschoss und den Treppenraum ausgebreitet, wogegen bei Brandfällen ohne FLA in insgesamt 21 % der Fälle mehrere Geschosse (5 %), der Flur (3 %), Treppenraum (5 %) oder ein Geschoss (5 %) betroffen waren. Die Flucht- und Rettungswege waren zum Eintreffzeitpunkt der Feuerwehr mit 58 % (7 von 12 Fällen bei FLA und 446 von 774 Fällen ohne FLA) gleichermaßen benutzbar. Der geringere Einsatz von zusätzlichem Löschwasser (in 9 von 11 Fällen weniger als 500 l) zusammen mit der geringeren Brandausbreitung zeigt, dass sich FLA tendenziell positiv auf die Begrenzung der Brandausbreitung und Unterstützung der wirksamen Löscharbeiten auswirken.

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

Tabelle 7.6 Auswertung von Brandschadenskriterien bei der Auslösung von automatischen Feuerlöschanlagen (FLA) im Brandfall im Vergleich zu Einsätzen, bei denen keine FLA vorhanden war (Quelle: vfdb-Brandschadenstatistik [7.62]; Phase I und II mit 5.016 Gebäudebrandeinsätzen von 28 Feuerwehren, inkl. 1.216 tatsächlichen Bränden; vgl. [7.38], [7.39] und [7.41])¹

Erfassungskriterium		Ausgelöst	
		FLA [Anzahl]	"keine FLA" [Anzahl]
Sachschaden	< 1.000 EUR	3	452
	< 10.000 EUR	2	132
	< 100.000 EUR ²	3	59
	< 500.000 EUR	0	10
	< 1.000.000 EUR	0	1
	> 1.000.000 EUR	0	1
	Keine Angabe möglich	3	76
	Summe	11	731
Brandausmaß	Gegenstand	8	534
	Raum	1	133
	Mehrere Räume	2	22
	Wohnung	0	9
	Geschoss	1	14
	Mehrere Geschosse	0	7
	Brandabschnitt	0	8
	Mehrere Brandabschnitte	0	2
	Treppenraum	1	3
	Gesamtgebäude	0	13
	Weitere Gebäude	0	2
	Summe	13	747
Rauchausbreitung	Nicht nennenswert	4	374
	Raum, Schacht	3	117
	Wohnung	3	119
	Geschoss	1	54
	Treppenraum	1	48
	Flur	0	25
	Mehrere Geschosse	0	37
	Summe	12	774
	Rauchschichtung erkennbar	3	158
	Rettungsweg benutzbar	7	446
LW-Einsatz	Kein Löschwasser	5	216
	< 500 L	4	375
	< 2500 L	0	105
	> 2500 L	2	45
	Summe	11	741

¹ Aufgrund der geringen Fallzahlen wird mangels Aussagekraft auf Prozentangaben verzichtet.

² Aufgrund der großen Wertekonzentration und des Schadenpotentials dürfte der verhinderte Sachschaden bei ausgelösten FLA deutlich größer sein als ohne FLA.

7.3.6 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Löschanlagen

Wie in Abschnitt 7.1 angedeutet, lässt sich die Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Brandmeldeanlagen mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeitsberechnung unter Berücksichtigung der individuellen Randbedingungen genauer untersuchen [7.5] (vgl. Kapitel 10).

Alternativ kann ein vereinfachtes semi-probabilistisches Verfahren [7.4], [7.5] angewendet werden. Dabei wird das Naturbrandszenario betrachtet, das sich bei Funktionieren der betreffenden anlagentechnischen Maßnahme ergeben würde. Die individuell vorhandene Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlagentechnik, die Streuungen der beim Nachweis verwendeten Modellvariablen und die Unsicherheiten des Rechenmodells werden durch probabilistisch hergeleitete Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt.

Im Folgenden werden beispielhaft einige in den Muster-Verordnungen für Sonderbauten mit Stand 2014 für Verkaufsstätten und Stand 2008 für Garagen verankerte Regelungen zur Herabsetzung bestimmter Anforderung bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage angeführt.

- Ohne Sprinklerschutz müssen tragende Wände, Pfeiler und Stützen bei erdgeschossigen Verkaufsstätten feuerhemmend ausgeführt werden, während bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage keine Anforderungen an das Tragwerk gestellt werden.
- Die Rauchabschnittsgröße von ungesprinklerten geschlossenen Garagen beträgt 2.500 m², beim Vorhandensein einer Sprinkleranlage darf die Rauchabschnittsgröße maximal 5.000 m² betragen.

Vorhabenbezogene Brand- und Löschversuche, besonders ab 1992 bis heute, mit dem Ziel der anlagentechnischen Kompensation von baulichen Maßnahmen mit einem gleich hohen Sicherheitsniveau haben gezeigt, dass der Einsatz von wasserbasierten Lösch- und Brandbekämpfungsanlagen für den Schutz brandschutztechnisch ungeschützter Holz-, Stahl- und Glaskonstruktionen mit der Anwendung spezifischer Brandmelde-/Düsenkombinationen (sichere Branderkennung bei Längs- und Querlüftungen bis 6 m/s und Wärmefreisetzungsrate bis 15,0 MW sowie Wärmestromdichte bis 460 kWh/m²), als eine anlagentechnische Kompensation möglich ist. Je nach gewählter Verteilungsart und Intensität des Löschmittels Wasser (Wirkung unmittelbar an der Bauteiloberfläche/Brennstoffoberfläche und/oder räumliche Wirkung in der Umgebung der Reaktionszone der Flamme sowie der vom Brandherd aufsteigenden heißen Brand- und Rauchgasschicht) konnten unter anderem folgende Ergebnisse erzielt werden:

- keine Temperaturerhöhung von Bauteilen und Konstruktionen über 90°C (bei Holz nicht über 50°C),
- keine Temperaturerhöhung der Umgebungsluft auf über 30°C bei einem vertikalen Temperaturgefälle von bis zu 10°C,
- Schaffung akzeptabler Sichtverhältnisse von bis zu 15 Metern und mehr,
- Reduzierung des Wärmestrahlungsdurchganges auf Werte unter 8 bis 10 kW/(m²), teilweise bis unter 2,5 kW/m².

7.4 Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

7.4.1 Allgemeines

Die Bezeichnung Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA) ist ein Sammelbegriff für Natürliche Rauchabzug-Anlagen (NRA), Maschinelle Rauchabzug-Anlagen (MRA), Rauch-Differenzdruck-Anlagen (RDA) sowie Wärme-Abzüge (WA), die im fortentwickeltem Brandstadium mit Hilfe schmelzbarer Flächen eine thermische Entlastung ermöglichen [7.62].

Zu den Rauch- und Wärmeabzugsanlagen nicht direkt zuordenbar sind die sogenannten Öffnungen zur Rauchableitung. Diese nutzen ebenfalls den thermischen Auftrieb, erfüllen aber nur die Mindestanforderungen nach Bauordnung. Für solche Öffnungen zur Rauchableitung können keine sicheren Vorhersagen zur Funktionssicherheit, zur Wirkung und zur Wirksamkeit gegeben werden. Damit sind sie im Nachweisverfahren z. B. mit Ingenieurmethoden nicht ausreichend geeignet.

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen erfüllen bei richtiger Dimensionierung im Brandfall die folgenden Aufgaben:

- Unterstützung einer eigensicheren sowie wirkungsvollen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr, indem die Sichtung des Brandherdes verbessert wird,
- Unterstützung bei der Rettung von Personen durch Verringerung von Rauch- und Brandgasen, damit eine Verbesserung der Atmung sowie der Erkennbarkeit von Fluchtwegen erreicht wird und Möglichkeiten der schnelleren Auffindbarkeit durch Rettungskräfte geschaffen werden,
- Verhinderung bzw. Verzögerung des Feuerübersprungs (Flash-Over),
- Verringerung von Brandfolgeschäden durch Rauch- und Brandgase (Schutz von rauchempfindlichen Sachwerten) und damit Sicherung des Unternehmens,
- Verminderung der thermischen Beanspruchung von Bauteilen durch Abfuhr der Brandwärme.

Die erforderliche Öffnungsfläche von natürlichen oder die Rauchgasvolumenförderung von maschinellen Rauchabzugsanlagen hängt insbesondere von folgenden Randbedingungen ab:

- Nutzung des Raumes,
- Höhe des Raumes,
- erforderliche Höhe der raucharmen Schicht,
- vorhandene Brandlasten,
- erwartete Brandentwicklungsdauer,
- Größe und Höhe der Zuluftfläche,
- Höhe der Rauchschrägen,
- anlagentechnische Wechselwirkungen (z. B. Lüftungsanlagen, Löschanlagen).

7.4.2 Arten von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

7.4.2.1 Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlage (NRA)

Die Wirkung der NRA basiert auf der Ableitung von Rauch- und Brandgasen über natürliche Auftriebskräfte und eine sich unter der Raumdecke einstellende Druckdifferenz zur Außenluft. Dazu ist mindestens eine 1 m dicke Rauchschiicht unter der Decke zu stabilisieren. Eine zeitnah zur Öffnung der NRA wirkende ausreichende große und möglichst bodennahe Zuluftnachströmung ist eine wesentliche Voraussetzung für die Rauchabzugswirkung.

Die Begrenzung des Rauchabschnittes ist eine wesentliche Voraussetzung für die Stabilität der Rauchschiicht, ebenso die Verhinderung von im Brandfall noch zusätzlich aufgeprägten Strömungen innerhalb der Rauchschiicht (z. B. weiterlaufende Raumlüftungsanlagen). Wesentliche Hinweise zu den NRWG sind veröffentlicht in DIN EN 12101-2 [7.51], Grundlagen zur Projektierung und zum Einbau von NRA sind veröffentlicht in DIN 18232-2 [7.52], VdS 2098 [7.53] und VDI 6019-1 und -2 [7.43]. Die Höhe der raucharmen Schicht, sowie die Wirkungsweise des vorgesehenen Entrauchungssystems werden errechnet und die notwendigen Entrauchungsflächen bzw. Volumenströme, sowie die erforderliche Zuluftnachströmung bestimmt. Bild 7.9 zeigt den Aufbau einer NRA.

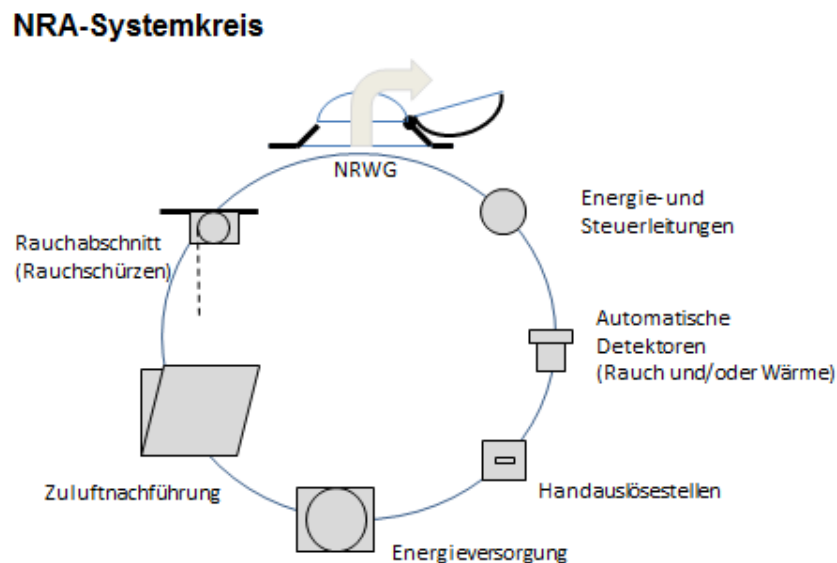


Bild 7.9 Aufbau einer natürlichen Rauchabzugsanlage

7.4.2.2 Maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsanlage (MRA)

Die Wirkung der MRA basiert auf der Ableitung von Rauch- und Brandgasen durch maschinell erzeugten Volumenaustausch aus der Rauchschiicht in die Außenluft. Dazu ist mindestens eine 1 m dicke Rauchschiicht unter der Decke zu stabilisieren. Eine bereits vor Einschalten der MRA wirkende möglichst bodennahe Zuluftnachströmung mit geringen Geschwindigkeiten (< 1 m/s) ist eine wesentliche Voraussetzung für die Rauchabzugswirkung.

Die Begrenzung des Rauchabschnittes ist eine wesentliche Voraussetzung für die Stabilität der Rauchschiicht, ebenso die Verhinderung von im Brandfall noch aufgeprägten zusätzlichen Strömungen innerhalb der Rauchschiicht (z. B. weiterlaufende Raumlüftungsanlagen).

Wesentliche Hinweise zu den Rauchgasventilatoren sind veröffentlicht in DIN EN 12101-3 [7.54], Grundlagen zur Projektierung und zum Einbau von MRA sind veröffentlicht in DIN 18232-5 [7.55] und VDI 6019-1 und -2 [7.43]. Bild 7.10 zeigt den Aufbau einer MRA.

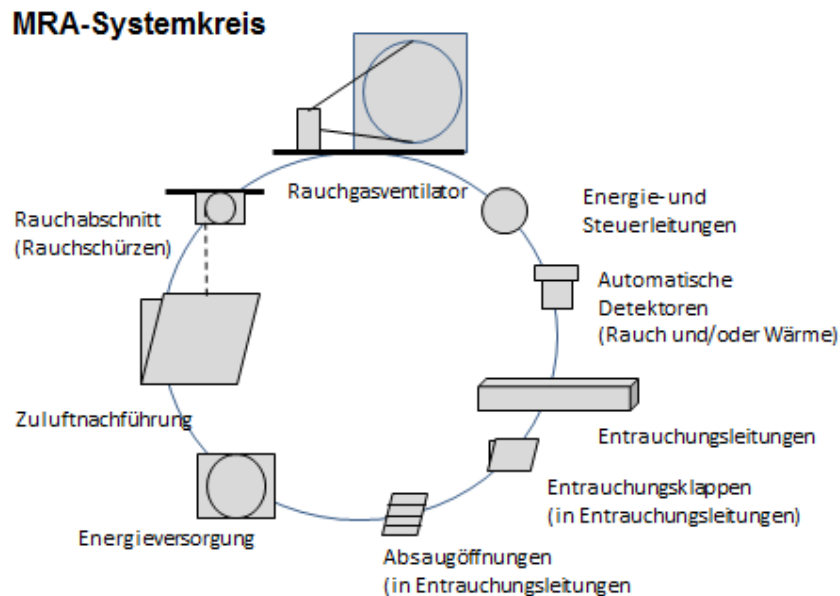


Bild 7.10 Aufbau einer maschinellen Rauchabzug-Anlage

7.4.2.3 Rauch-Druckdifferenzanlagen (RDA)

RDA bewirken mit einem maschinell erzeugten Überdruck eine Rauchfreiheit des zu schützenden Raumes, z. B. des Sicherheitstreppenraumes in Hochhäusern. Bei der Druckdifferenzmethode wird durch Ventilatoren ein kontrollierter Überdruck in dem zu schützenden Raum (Treppenraum, Schleuse, Treppenvorraum) erzeugt, der bei geschlossener Türe den Eintritt von Rauch- und Brandgasen in den zu schützenden Bereich verhindert. Dabei muss die zur Öffnung der Verbindungstüre notwendige Kraft auf maximal 100 N reduziert sein, damit die Nutzer bei so begrenzten Türöffnungskräften sicher in den schützenden Raum eintreten können. Damit ist z. B. auch der notwendige Türschließer ein Teil der RDA.

Wird eine Türe geöffnet ist die vorhandene Druckdifferenz nicht ausreichend, den Raucheintritt durch diese in den zu schützenden Bereich zu verhindern. Vielmehr ist dann eine ausreichende Luftströmung zu erzeugen, die die gesamte Türöffnung füllend aus dem zu schützenden Bereich in den benachbarten Raum einströmt. Über eine ausreichende Abströmöffnung werden diese Volumenströme dann im Brandgeschoss nach außen abgeleitet. Fehlt diese Abströmöffnung, oder wird diese zu spät geöffnet, würde nach einem sehr schnell erfolgenden Druckausgleich Rauch auch in den zu schützenden Bereich strömen. Die Auslegung der RDA erfolgt so, dass ein vorgegebener Luftvolumenstrom (z. B. 2 m/s) in der offenen Tür den Raucheintritt in den zu schützenden Bereich verhindert.

Wesentliche Hinweise zu den Bausätzen von RDA werden in einer komplett überarbeiteten DIN EN 12101-6 [7.56] veröffentlicht. Die Fassung der DIN EN 120101-6 [7.56] aus 2005 enthält Fehler und sollte nicht mehr eingesetzt werden. Wesentliche Hinweise zur Projektierung, zum Einbau, zur Abnahme und zur Instandhaltung von RDA werden in einer neuen DIN EN 12101-13 [7.57] veröffentlicht (bis zur Veröffentlichung kann hilfsweise die VDMA 24188 [7.58] angewendet werden).

Die Projektierung der RDA hängt insbesondere von folgenden Randbedingungen ab:

- Höhe des Gebäudes (bzw. des Treppenraums),
- Druckwiderstände im zu schützenden Bereich (z. B. Größe des Treppenauges, Ausführung der Geländer)
- Fläche der Leckagen (Druckverluste),
- Fläche der Türen und Kräfte der Türöffner,
- Ausbildung der Geschosspläne (mit oder ohne Vorraum, geschützt oder ungeschützt, mit oder ohne angeschlossenem Flur) sowie Lage und Größe der Abströmung,
- Eingangstüren im Brandfall überwiegend geschlossen oder offen (eine überwiegend offene Haus-Eingangstüre erfordert u. U. einen separaten Schacht zur Zuluftzuführung in jedem Geschoss,
- Auslegungskriterien für die bestimmungsgemäße Nutzung von Türen im Brandfall,
- Art der gewählten Anlagensteuerung und Druckentlastung (bei geschlossenen Türen),
- anlagentechnische Wechselwirkungen (z. B. zu Lüftungsanlagen, Löschanlagen).

RDA wirken eng mit weiteren Maßnahmen des baulichen, des anlagentechnischen Brandschutzes sowie der Haustechnik zusammen. Eine RDA ist immer automatisch anzusteuern (im Regelfall über eine flächendeckende BMA). Die RDA-Projektierung ist zu einem möglichst frühen Zeitpunkt mit in die Gebäudeplanung einzubeziehen.

Vor Beginn der Gebäudenutzung und nach jeder relevanten Veränderung sind die Systemeinstellungen der RDA zu ermitteln und gegebenenfalls zu justieren. Eine RDA ist jährlich durch eine befähigte Person auf ihre Funktion und Justierung zu prüfen und regelmäßig instand zu halten. Bild 7.11 zeigt den Aufbau einer RDA.

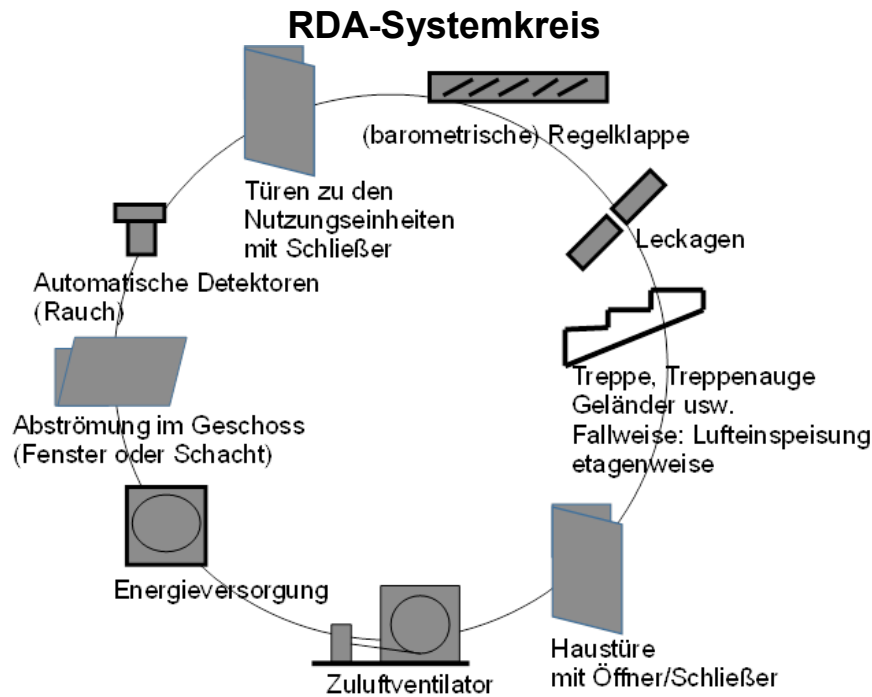


Bild 7.11 Aufbau einer Druckdifferenzanlage (RDA)

7.4.2.4 Wärmeabzüge (WA)

Bei der im Verlauf der Brandentwicklung dominierenden Wärmefreisetzung können zur Verlängerung der Standsicherheit der tragenden Gebäudeteile neben den vorhandenen NRA und MRA abschmelzende Lichtflächen (WA) zur thermischen Entlastung eingesetzt werden. Diese werden z. B. im Nachweis nach MIndBauRL berücksichtigt, um für Industriebauten die zulässige Größe der Brandabschnitte und der Brandbekämpfungsabschnitte zu vergrößern bzw. die Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile zu verringern.

Wesentliche Hinweise zu Wärmeabzügen können der DIN 18230-1 [7.2], DIN 18232-4 [7.59] und DIN 18232-7 [7.60] entnommen werden.

7.4.3 Wirkung von Rauch- und Wärmeabzügen

Die Berücksichtigung der Wirkung von RWA auf das Brandszenario ergibt sich durch die Änderung der Ventilationsverhältnisse. Man unterscheidet hier zwischen ventilationsgesteuerten und brandlastgesteuerten Bränden. Dies hat einen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates, sofern der Brand ventilationsgesteuert verläuft (Bild 7.12). Außerdem wird durch den Wärmeabzug die Heißgastemperatur reduziert, was z. B. in der Industriebaurichtlinie zu einer möglichen Vergrößerung des Brandabschnittes oder der Reduzierung der Anforderungen an den Feuerwiderstand führt. Der Einfluss des verbesserten Wärmeabzugs durch die Vergrößerung der Ventilationsöffnungen zur Berechnung der mittleren Heißgastemperatur wird im brandlastgesteuerten Fall berücksichtigt (Bild 7.13).

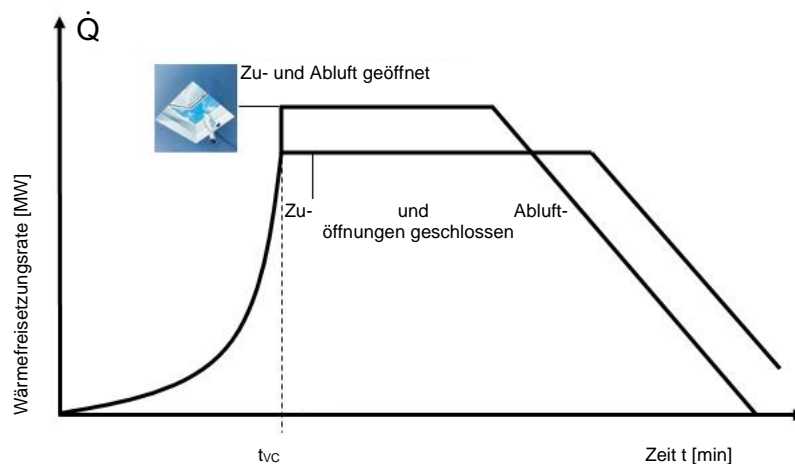


Bild 7.12 Einfluss von Rauch- und Wärmeabzügen auf die Wärmefreisetzungsrate bei einem ventilationsgesteuerten Brand

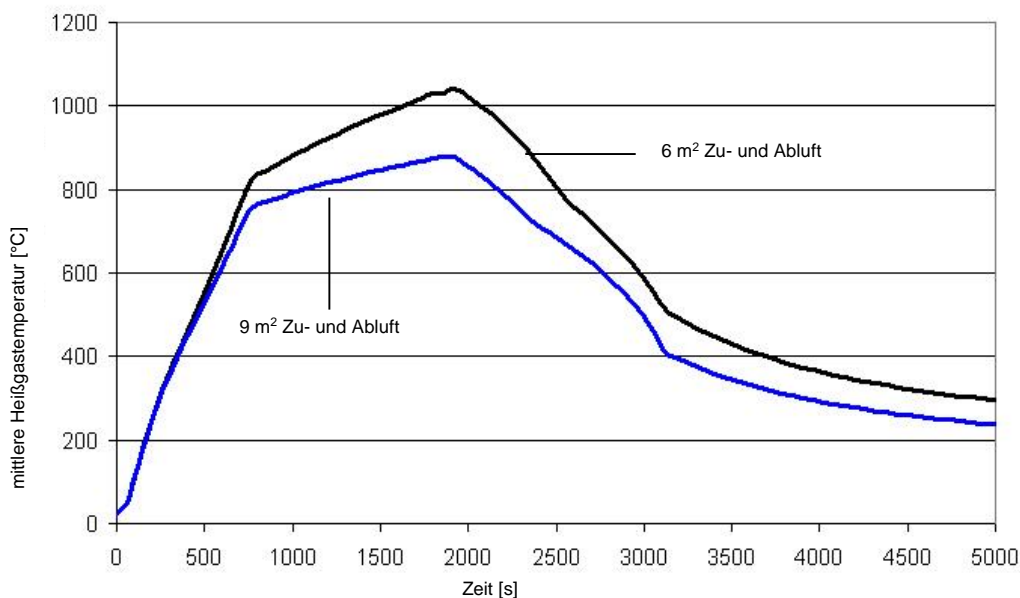


Bild 7.13 Einfluss des verbesserten Wärmeabzuges durch größere Ventilationsöffnungen auf die mittlere Heißgastemperatur bei einem brandlastgesteuerten Brand

7.4.4 Zuverlässigkeit von RWA

Für die Bewertung der Zuverlässigkeit von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen sind statistische Daten unter <http://www.ref14.vfdb.de/brandstatistik/funktionssicherheit> veröffentlicht. Der TÜV e.V. erfasst jährlich die Mängelquoten von RWA bei den vom TÜV durchgeführten Erst- und Wiederholungsprüfungen (Tabelle 7.7). Die vom TÜV überprüften RWA (in 2016 ca. 8.000 Rauchabzugsgeräte/-Öffnungen) werden in der Statistik nicht differenziert in die unterschiedlichsten Ausführungsarten (MRA, Öffnungen zur Rauchableitung, mit oder ohne automatischer oder auch manueller Auslösung, usw.). Die Qualität der Errichtung und des Wartungszustandes dieser RWA unterlag keinen besonderen Anforderungen. Damit wird hier der Zustand im

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

Durchschnitt des Gebäudebestandes beschrieben. Die schlechtere Mängelquote bei den wiederkehrenden Prüfungen ist u. a. auf eine in einzelnen Objekten fehlende oder mangelhafte Instandhaltung zurückzuführen.

Tabelle 7.7 Mängelquoten RWA Baurechtsreport 2016 VdTÜV [7.61]

	erstmalige Prüfung	wiederkehrende Prüfung
mängelfrei	49,6%	44,6%
geringe Mängel	27,2%	32,5%
wesentliche Mängel	23,2%	22,9%
Summe	100,0%	100,0%

Vom FVLR wurden mehrere Hunderttausend NRW, die überwiegend nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik (z.B. DIN 18232 [7.52], VdS 2098 [7.53] und DIN EN 12101 [7.51]) geplant, errichtet und regelmäßig durch anerkannte Fachfirmen instandgehalten wurden, im Rahmen der regelmäßigen Instandhaltung erfasst (Tabelle 7.8).

Tabelle 7.8 Vom FVLR e.V. erfasste Funktionszustände von NRW vor der jeweiligen Instandhaltung (https://www.fvlr.de/rwa_stat_funktionssicherheit.html)

Überprüfung im Rahmen der Instandhaltung	
funktionstüchtig	98,98%
bauseitige Beschädigung	0,02%
missbräuchliche Nutzung / unterlassene Rückstellung	0,01%
bauseitigen Eingriff / Behinderung der Öffnung	0,62%
fehlerhafte NRA-Errichtung	0,12%
Versagen von NRA-Bauteilen	0,10%
andere Gründe	0,16%
Summe nicht funktionstüchtig	1,02%

Für die Bewertung der Funktionssicherheit von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (ohne Differenzierung der Anlagenart) können die vom TÜV bei der Sachverständigenprüfung ermittelten Mängelquoten vorzugsweise für den Nachweis von älteren Anlagen bzw. von Anlagen, deren Anlagentechnik den allgemein anerkannten Regeln der Technik vermutlich nicht entsprechen, angesetzt werden.

Für die Bewertung der Funktionstüchtigkeit von natürlichen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (NRA), die nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik geplant, errichtet und regelmäßig instandgehalten werden, können die vom FVLR bei der Instandhaltung ermittelten Werte angesetzt werden.

Zuverlässigkeitswerte für maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Rauchdruckdifferenzanlagen und Wärmeabzüge liegen nicht vor.

Für den Fall, dass NRWA-Anlagen bei Branderkennung manuell durch Betriebspersonal geöffnet werden, gibt [7.7] aufgrund von einer Expertenbefragung einige grobe Anhaltswerte zur Zuverlässigkeit. Diese sind jedoch auf moderne RWA-Anlagen, die stets auch eine automatische Auslösung vorsehen, nicht übertragbar.

7.4.5 Wirksamkeit von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

Auf Grundlage der vfdb-Brandschadenstatistik (vgl. z. B. [7.38], [7.39], [7.40], [7.41], [7.42]; [7.62], Phase I und II mit 5.016 Einsatzberichten von 28 Feuerwehren mit insgesamt 1.216 echten Brandereignissen) kann die Wirksamkeit von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) anhand verschiedener Brandschadenskriterien bemessen werden (vgl. Kapitel 7.2.5 und 7.3.5).

Tabelle 7.9 zeigt die Auswertung der Brandschadenskriterien bei Auslösung von natürlichen und maschinellen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) im Vergleich mit Fällen, bei denen keine Anlagentechnik nach Angaben der Feuerwehren vorhanden war. Von den 5.016 erfassten Gebäudebrandeinsätzen liegen in 38 Fällen Angaben zu RWA mit differenzierten Angaben zu den Schadenskriterien vor. Diese geringe Fallzahl liegt unter anderem darin begründet, da RWA vorwiegend in komplexeren Gebäuden eingebaut sind. Diese Fälle können daher auch ein höheres Schadenpotential beinhalten, als ihn der durchschnittliche Gebäudebestand aufweist. Der Wirksamkeitsnachweis für RWA ist statistisch demzufolge noch nicht vollständig belastbar, erlaubt aber bereits mehr als nur tendenzielle Schlussfolgerungen – ähnlich wie dies bei den Feuerlöschanlagen (siehe Kapitel 7.3.5) der Fall ist.

Aus Tabelle 7.9 lässt sich ein Trend hinsichtlich der Wirksamkeit von RWA ableiten. Es wurden bei Vorhandensein einer RWA keine Brandfälle erfasst, in denen der Sachschaden größer 100.000 EUR geschätzt wurde und nur 8 Brandfälle (22 %) in denen der geschätzte Sachschaden bei größer 10.000 EUR liegt – und das obwohl bei Gebäuden mit einer RWA mit einem großen Schadenspotenzial zu rechnen ist. Das Brandausmaß ist im Vergleich ähnlich häufig auf einen Gegenstand begrenzt (67 % bei Bränden mit Auslösung einer RWA). Hinsichtlich der Rauchausbreitung ist der Anteil der Brandfälle mit Ausbreitung in den Treppenraum bei Brandeinsätzen mit ausgelöster RWA deutlich höher (26 % im Vergleich zu 6 % bei Einsätzen ohne RWA). Dies lässt sich aus der baurechtlichen Anforderung der Rauchabzugsöffnung im Treppenraum sowie den natürlichen Strömungswegen im Gebäude ableiten. Über verschiedene RWA-Systeme werden verschiedene Wirkmechanismen (Rauchableitung, Rauchfreihaltung sowie RWA zur Erzeugung einer raucharmen Schicht) zur Erreichung unterschiedlicher Schutzziele zusammengefasst. Bei der erfassten Anzahl an Fällen für die RWA ist eine Differenzierung der Wirksamkeit nach den verschiedenen Systemen noch nicht möglich. Es zeigt sich allgemein, dass bei Auslösung von RWA tendenziell weniger Löschwasser eingesetzt wird im Vergleich zu Brandfällen bei denen keine RWA vorhanden ist: So wurde in 45 % der Fälle kein Löschwasser eingesetzt (29 % bei Bränden ohne RWA). Es lässt sich daher über die Schadenskriterien ein positiver Einfluss von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen auf die Wirksamkeit der mobilen Brandbekämpfungsmaßnahmen durch die Einsatzkräfte belegen. Hier spiegeln sich die schnelle Lokalisierung des Brandherdes bei vergleichbar besserer Sicht und damit zeitnaher Ablöschung des Brandherdes sowie die frühzeitige Wärmeabfuhr wieder.

Tabelle 7.9 Auswertung von Brandschadenskriterien bei der Auslösung von natürlichen und maschinellen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) im Brandfall im Vergleich zu Einsätzen bei denen keine RWA vorhanden war (Quelle: vfdb-Brandschadenstatistik [7.62]; Phase I und II mit 5.016 Gebäudebrandeinsätzen von 28 Feuerwehren, inkl. 1.216 tatsächlichen Bränden; vgl. [7.38], [7.39] und [7.41])

Erfassungskriterium		Ausgelöst		Anteil		
		RWA [Anzahl]	"keine RWA" [Anzahl]	RWA [%]	"keine RWA" [%]	
Sachschaden	< 1.000 EUR	18	452	50	69	
	< 10.000 EUR	10	132	28	20	
	< 100.000 EUR	8	59	22	9	
	< 500.000 EUR	0	10	0	2	
	< 1.000.000 EUR	0	1	0	0	
	> 1.000.000 EUR	0	1	0	0	
	Keine Angabe möglich	2	76	---	---	
Summe		38	731	100	100	
Brandausmaß	Gegenstand	24	534	67	71	
	Raum	9	133	25	18	
	Mehrere Räume	1	22	3	3	
	Wohnung	0	9	0	1	
	Geschoss	0	14	0	2	
	Mehrere Geschosse	0	7	0	1	
	Brandabschnitt	1	8	3	1	
	Mehrere Brandabschnitte	0	2	0	0	
	Treppenraum	1	3	3	0	
	Gesamtgebäude	0	13	0	2	
	Weitere Gebäude	0	2	0	0	
	Summe		36	747	100	100
Rauchausbreitung	Nicht nennenswert	4	374	7	48	
	Raum, Schacht	9	117	17	15	
	Wohnung	14	119	26	15	
	Geschoss	5	54	9	7	
	Treppenraum	14	48	26	6	
	Flur	6	25	11	3	
	Mehrere Geschosse	2	37	4	5	
	Summe		54	774	100	100
	Rauchschichtung erkennbar		12	158	---	---
Rettungsweg benutzbar		25	446	---	---	
LW-Einsatz	Kein Löschwasser	17	216	45	29	
	< 500 L	14	375	37	51	
	< 2500 L	5	105	13	14	
	> 2500 L	2	45	5	6	
	Summe		38	741	100	100

7.4.6 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch RWA

RWA dienen der Ausbildung einer raucharmen Zone (Schicht) entsprechender Höhe im Raum. Die bauordnungsrechtliche Forderung nach RWA dient insbesondere zur Unterstützung der Feuerwehr bei der Fremdrettung und der Durchführung wirksamer Löscharbeiten im Sinne des Schutzzieles. Eine Rauchableitung aus Rettungswegen zur Sicherstellung der Benutzbarkeit in der Phase der Personenrettung ist in Regelbauten nicht vorgesehen. Entsprechende Schutzzielefestlegungen finden sich im Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht - „Rettung von Personen“ und „wirksame Löscharbeiten“ - bauordnungsrechtliche Schutzziele mit Blick auf die Entrauchung [7.47]. Darüber hinaus dienen RWA durch die thermische Entlastung von Bauteilen dem Schutz von Sachwerten und der Sicherung des Fortbestandes von Unternehmen.

Baurechtlich werden RWA bei Schutzzielen, die

- zusätzlich zu den Minimalanforderungen der Bauordnung umzusetzen oder gewünscht sind,
- als Kompensation von Abweichungen und Erleichterungen zur Bauordnung,
- oder innerhalb des Nachweises der Ingenieurmethoden angesetzt.

Die Möglichkeit der Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Rauch- und Wärmeabzugsanlagen lässt sich mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeitsberechnung genauer untersuchen (vgl. Kapitel 10). Hierzu müssten jedoch belastbare Werte für die Zuverlässigkeit im Anforderungsfall vorliegen.

Im Folgenden werden beispielhaft einige in den Muster-Verordnungen für Sonderbauten verankerten Regelungen mit Stand 2020 zur Herabsetzung bestimmter Anforderung bei Vorhandensein von RWA zusammengefasst:

- Bei Vorhandensein von wirksamer RWA in der Ladenstraße von gesprinkelten Verkaufsstätten darf der Rettungsweg auf der Ladenstraße entsprechend MVkVO eine zusätzliche Länge von 35 m haben.
- Nach der Muster-Industriebaurichtlinie bestehen je nach Sicherheitskategorie und Brandabschnittsfläche keine Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer tragender und aussteifender Bauteile in eingeschossigen Industriebauten begrenzter Abmessungen, wenn die Wärmeabzugsfläche mindestens 5 % der Grundfläche beträgt (NRA werden auf die WA-Fläche angerechnet).
- Nach der Muster-Industriebaurichtlinie können in Verbindung mit einer BMA und dem Einbau von mind. 1 NRWG pro 200 m² Grundfläche mit einer Rauchabzugsfläche von mindestens 1,5 m² A_w eine größere Brandabschnittsfläche ausgeführt werden.
- Nach MHHR ersetzt ein durch eine RDA geschützter Sicherheitstuppenraum den zweiten baulichen Rettungsweg bei Hochhäusern bis 60 m Höhe.

7.5 Auslösung von Brandschutzanlagen

7.5.1 Auslösearten

Die Auslösung von Brandschutzanlagen erfolgt entweder automatisch durch eine mit der Brandschutzanlage verknüpfte Branderkennung oder manuell durch Personen.

Die automatische Auslösung bedarf einer automatischen Brand- bzw. Rauch- oder Wärmeerkennung. Typische Auslöseelemente sind Elemente die auf Rauch, Wärme oder Flammen reagieren.

Brandmeldeanlagen werden bei automatischer Auslösung über elektronische Melder angesteuert, hierbei handelt es sich um Rauch-, Wärme- und Flammenmelder, es können auch Kohlenmonoxidsensoren zum Einsatz kommen.

Automatische Löschanlagen können entweder durch thermische Auslöseelemente (Glasampulle, Schmelzlot, vornehmlich bei Sprinkleranlagen) oder elektronische Auslöseelemente (Rauchmelder, Wärmemelder, Flammenmelder, z.B. Gaslöschanlagen, Wasserlöschanlagen mit offenen Düsenetzen) zur automatischen Auslösung gelangen.

Darüber zählen pneumatisch-hydraulische Auslösesysteme (Anregersysteme mit thermischen Detektionselementen) von Löschanlagen zu den automatischen Auslösesystemen.

Die automatische Auslösung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen erfolgt entweder durch thermische Auslöseelemente (Glasampulle, Schmelzlot) oder elektronische Auslöseelemente (Rauchmelder, Wärmemelder, Flammenmelder).

7.5.2 Auslösezeitpunkte

7.5.2.1 Allgemeines

Bei der Bestimmung von Auslösezeitpunkten der unterschiedlichen Brandschutzanlagen können die thermischen Auslöseelemente (Glasampulle, Schmelzlot) und die elektronischen Auslöseelemente (Rauchmelder, Wärmemelder, Flammenmelder) aufgrund ihrer jeweiligen eigenen Auslösecharakteristik, jeweils zusammengefasst betrachtet werden.

Für Auslösezeitpunkte von manuell ausgelösten Brandschutzanlagen existieren keine Anhaltswerte.

7.5.2.2 Auslöseelement Glasampulle

Automatische Auslösungen durch Glasampullen sind bei Löschanlagen bei geschlossenen Rohrsystemen vornehmlich für Sprinkleranlagen und Wassernebel-Löschanlagen im Einsatz, darüber hinaus werden natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte oftmals mit einer solchen Auslösung am Gerät ausgerüstet.

Der Auslösezeitpunkt der Glasampullen von natürlichen Rauch- und Wärmeabzugsgeräte kann näherungsweise analog zu den Auslösezeitpunkten von Sprinkleranlagen bestimmt werden.

Der Auslösezeitpunkt t_{act} von Sprinkleranlagen mit geschlossenem Rohrnetz (Glasampullen) wurde für unterschiedliche Brandintensitäten, Raumhöhen sowie Ansprechklassen und Trägheitsindexe in [7.43] empirisch bestimmt.

7.5.2.3 Elektronische Auslöseelemente

Automatische Auslösungen durch elektronische Auslöseelemente werden vornehmlich bei Löschanlagen mit offenen Rohrsystemen (Sprinkleranlagen, Wassernebel-Löschanlagen, Gaslöschanlagen), bei ggf. vorgesteuerten Löschanlagen, bei Brandmeldeanlagen und zur Ansteuerung von natürlichen oder maschinellen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen genutzt.

Der Auslösezeitpunkt von Rauchmeldern wird gemäß [7.43] mit 120 s festgelegt. Untersuchungen der Auslösezeiten bei Normbränden unter Laborbedingungen [7.44] ergaben bei Rauchmeldersequenzen gleicher Bauart zulässige Streuungen, die eine formelmäßige Bestimmung von Auslösezeiten in Frage stellen.

Für Wärmemelder können Auslösezeitpunkte anhand [7.45] bestimmt werden.

Die Bestimmung von Auslösezeitpunkten für Flammen- und Multisensor-/Mehrkriterien-Melder ist aktuell nicht in Formeln erfasst.

7.6 Abwehrender Brandschutz

7.6.1 Wirkung von Löscharbeiten auf das Brandszenario

7.6.1.1 Allgemeines

Maßgebend für den Einfluss einer Feuerwehr auf den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates ist der Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten bzw. die Zeitdauer bis zur Brandbeherrschung. Bei anerkannten Werkfeuerwehren wird vorausgesetzt, dass sie 5 Minuten nach ihrer Alarmierung an der Einsatzstelle eintreffen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Brandmeldung automatisch erfolgt.

Im Einzelfall muss durch ein operativ-taktisches Studium, beispielsweise im Rahmen einer objektspezifischen Einsatzvorplanung oder einer örtlichen Brandschutzbedarfsplanung (politische Festlegung des örtlichen Schutzniveaus), überprüft werden, mit welchen Fristen zu rechnen ist, da diese Zeiten von mehreren Einflussfaktoren beeinflusst werden. Als Anhaltspunkte können:

- die Art der Brandmeldung,
- die Anwesenheit von Betriebspersonal,
- eine automatische Brandmeldung,
- die Lage des Objekts (innerstädtisch oder außerbezirklich) in Bezug auf die Verkehrsdichte,
- die Anzahl der gesichert verfügbaren Einsatzkräfte und
- die Ausrüstung der Feuerwehr, etc.

herangezogen werden.

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

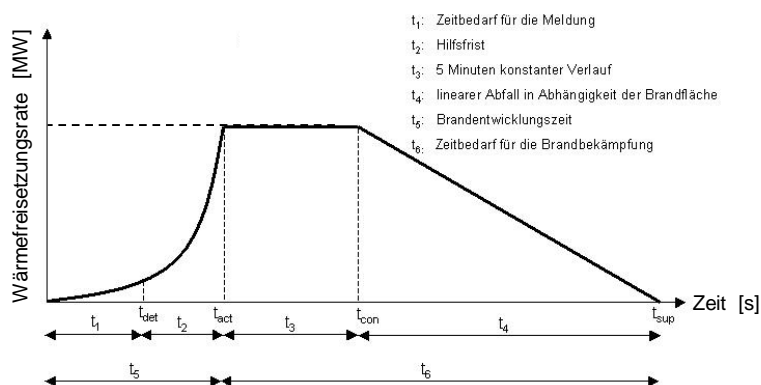


Bild 7.14 Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate (qualitativ) bei Einsatz einer Feuerwehr

Entscheidend für die Beantwortung der Frage, ob bei einer bestimmten Größenordnung eines Brandes überhaupt noch ein Einfluss der Feuerwehr auf die Wärmefreisetzungsrate angenommen werden kann, ist die Brandfläche zum Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten in Abhängigkeit der Brandentwicklung. Für den Bereich des Industriebaus wurden auf Grundlage von Untersuchungen von Schubert [7.16] Grenzwerte zur Berechnung von Löschflächen unter Berücksichtigung der im Industriebau vor allem bei eingeschossigen Hallen anzutreffenden Gegebenheiten in Abhängigkeit der Kräfte und Mittel der Feuerwehren ermittelt. Vergleichbare Untersuchungen zu Nicht-Industriegebäuden liegen nicht vor. Zur Vollständigkeit sei an dieser Stelle erwähnt, dass das auch von der vfdb unterstützte Forschungsprojekt „Innovative Sicherheitsarchitektur der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr (TIBRO)“ [7.46] weder von den dortigen Zielstellungen noch von den Ergebnissen für die Anwendung von Ingenieurmethoden Bedeutung hat.

Es kann konservativ angesetzt werden, dass die Wärmefreisetzungsrate nach Beginn der Löscharbeiten noch für eine Dauer von 5 Minuten konstant verläuft und anschließend linear abklingt. In Bild 7.14 ist der qualitative Verlauf der Wärmefreisetzungsrate dargestellt. Bezüglich des Maximums der Wärmefreisetzungsrate muss unterschieden werden, ob der Zeitpunkt t_{act} in der Brandentwicklungsphase (\dot{Q}_{FK}) oder in der Phase des brandlast- bzw. ventilationsgesteuerten Brandes (\dot{Q}_{fc} bzw. \dot{Q}_{vc}) liegt. Die lineare Beschreibung des abklingenden Astes stellt eine rechentechnische Vereinfachung dar. In der Realität ergibt sich analog zur Brandwachstumsphase ein konkaver Kurvenverlauf (vgl. Bild 4.1 in Kapitel 4). Die Steigung des abklingenden Astes hängt von der maximal auftretenden Brandfläche ab. Je größer diese Brandfläche werden kann, desto länger dauert es, bis der Brand komplett eingedämmt ist.

Von der Brandfläche kann näherungsweise auf die maximale Wärmefreisetzungsrate geschlossen werden. Die Grenzwerte wurden auf Basis von Expertenaussagen festgelegt:

$$\dot{Q} \leq 20 \text{ MW} \quad t_4 = 30 \text{ min} \quad (7.4)$$

$$20 \text{ MW} < \dot{Q} \leq 50 \text{ MW} \quad t_4 = 45 \text{ min} \quad (7.5)$$

$$\dot{Q} > 50 \text{ MW} \quad t_4 = 60 \text{ min} \quad (7.6)$$

Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrate ergibt sich wie folgt:

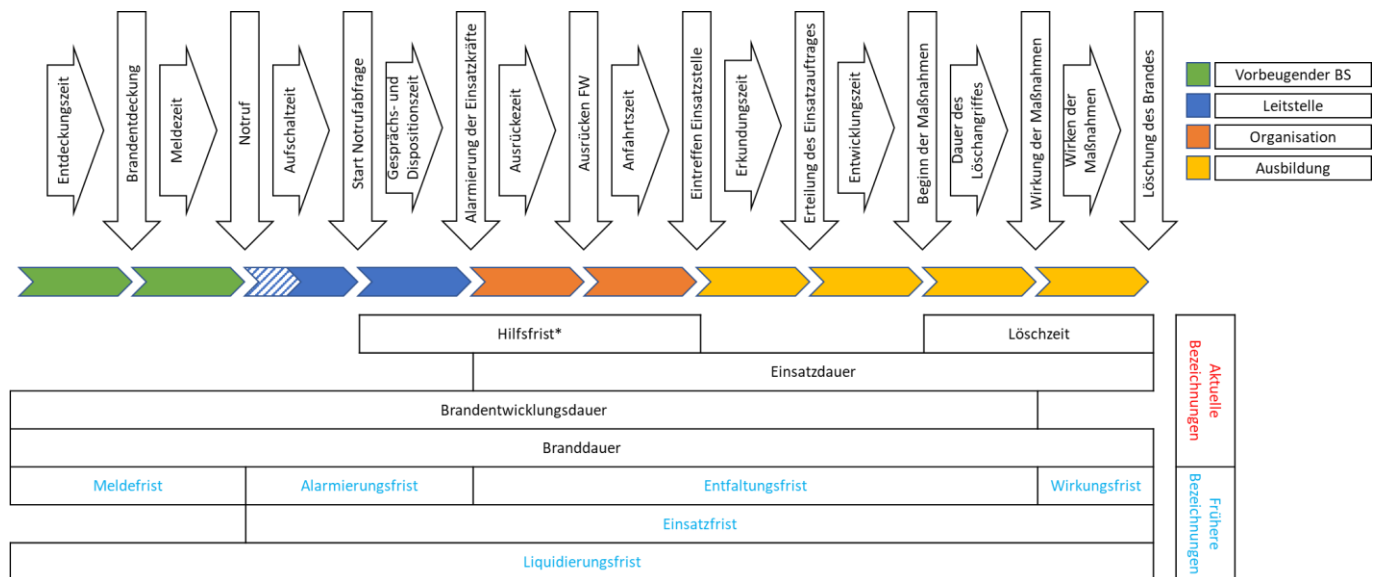
$$0 - t_{act}: \quad \dot{Q}(t) = \left(\frac{t}{t_{\alpha}}\right)^2 \quad [MW] \quad (7.7)$$

$$t_{act} - t_{con}: \quad \dot{Q}(t) = \dot{Q}_{max}(t_{act}) \quad [MW] \quad (7.8)$$

$$t_{con} - t_{sup}: \quad \dot{Q}(t) = \frac{\dot{Q}_{max}(t_{act})}{t_{sup} - t_{con}} \cdot (t_{sup} - t) \quad [MW] \quad (7.9)$$

Für öffentliche Feuerwehren finden unterschiedliche Planungsgrößen Anwendung, wobei regelmäßig die von der AGBF empfohlene Zeit von 8 Minuten als sogenannte Hilfsfrist für die Zeit vom Beginn der Abgabe einer Meldung über ein Schadenereignis an die Feuerwehr, die Dispositionszeit, die Alarmierungszeit, die Ausrückzeit und die Anfahrtszeit bis zum Eintreffen der ersten Einsatzkräfte am Einsatzort das Ausrücken und die Anfahrt der Feuerwehr herangezogen wird [7.23]. Bild 7.15 zeigt den Einsatz der öffentlichen Feuerwehr von der Brandentstehung bis zum Abschluss der Löscharbeiten in Form eines Ablaufdiagramms.

Eine Quantifizierung der Wirkung von öffentlichen Feuerwehren auf das Brandszenario im Rahmen von ingenieurmäßigen Nachweisen kommt derzeit in Ermangelung valider Daten nicht bzw. nur nach Absprache mit der zuständigen Brandschutzdienststelle in Betracht.



* Die Hilfsfrist ist unterschiedlich definiert. Hier ist die Definition der AGBF verwendet. Als erweiterte Hilfsfrist wird der Zeitraum bezeichnet, der eine zweite Feuerwehreinheit bis zum Eintreffen benötigt.

Bild 7.15 Ablaufdiagramm mit Zeiträumen für den Einsatz einer Feuerwehr [7.36]

7.6.1.2 Hilfsfrist

Die Hilfsfrist ist nach DIN 14011 [7.23] definiert als die Zeitdauer vom Beginn der Abgabe einer Meldung bis zum Eintreffen der ersten Einsatzkräfte am Einsatzort. Sie setzt sich zusammen aus der Dispositionszeit, der Alarmierungszeit, der Ausrückzeit der Einsatzkräfte und der Anfahrtszeit zum Einsatzort.

7.6.1.3 Eingreifzeit

Um die Wirkung der Löschmaßnahmen durch eine Feuerwehr auf das Brandszenario quantifizieren zu können, muss die Zeitdauer vom Brandausbruch bis zum Beginn der Brandbekämpfung bekannt sein. Näherungsweise entspricht dies der Eingreifzeit, die nach DIN 14011 [7.23] als Zeitspanne zwischen dem Entdecken eines Brandes und dem Wirksamwerden der befohlenen Maßnahmen nach der Erkundungs- und Entwicklungszeit am Einsatzort definiert ist. Die Eingreifzeit setzt sich zusammen aus Meldezeit, Dispositionszeit, Alarmierungszeit, Ausrückezeit, Anfahrtszeit, Erkundungszeit und Entwicklungszeit (siehe Bild 7.15). Sie hängt im Wesentlichen ab von

- der Entdeckung des Brandherdes,
- der Entfernung des Brandortes von der alarmierten Feuerwache,
- der durchschnittlichen Verkehrsdichte auf der Anfahrtsstrecke und besonderen Zeitverzögerungspunkten (z. B. Bahnübergänge),
- der Art und Nutzung des Objektes (der Zeitbedarf für die Erkundung und Entwicklung ist z. B. bei Tunnelbauwerken sehr viel größer als bei Einfamilienhäusern),
- der zur Verfügung stehenden Einsatzkräfte, insbesondere der atemschutztauglichen Einsatzkräfte,
- dem Ausbildungsstand der Feuerwehrleute,
- der Zugänglichkeit des Objektes.

Der Ausbildungsstand der Feuerwehrleute kann vereinfacht als bundesweit einheitlich angenommen werden und hängt nicht davon ab, ob es sich um haupt- oder ehrenamtliche Feuerwehrkräfte handelt. Die Zugänglichkeit ist zumindest bei Vorhandensein einer BMA durch ein Feuerwehrschlüsseldepot geregelt, daher werden hier nur in Ausnahmefällen zeitverzögernde Erschwernisse auftauchen. Auch die Erkundungs- und Entwicklungszeit lässt sich für die verschiedenen Bauwerkstypen näherungsweise festlegen. Die letzten drei Einflussfaktoren lassen sich damit relativ gut abschätzen. Die am schwersten vorhersagbare Größe ist der Zeitbedarf für die Wegstrecke zwischen dem Standort der Feuerwehr (Feuerwache, Feuerwehrgerätehaus) und Brandort, der von den beiden erstgenannten Punkten abhängt, der Wegstrecke und der Verkehrsdichte.

Durch eine statistische Auswertung von Feuerwehreinsatzdatenblätter wurden p-Quantile (p %-Fraktile) der Zeitspanne zwischen der Alarmierung und Beginn der Löschmaßnahmen in Abhängigkeit von der effektiven Entfernung zwischen Feuerwache und Brandort ermittelt [7.4]. Diese Zeitspanne entspricht näherungsweise der oben definierten Eingreifzeit. Die Ergebnisse können in Bild 7.16 abgelesen werden.

Es handelt sich bei den Daten um ein Beispiel für eine Großstadt mit ca. 260.000 Einwohnern. Im Einzelfall ist zu berücksichtigen, dass gleichzeitige Brandereignisse, Staus, Verkehrsentwicklungen und Straßenumplanungen einen nennenswerten Einfluss auf die Eingreifzeiten haben können.

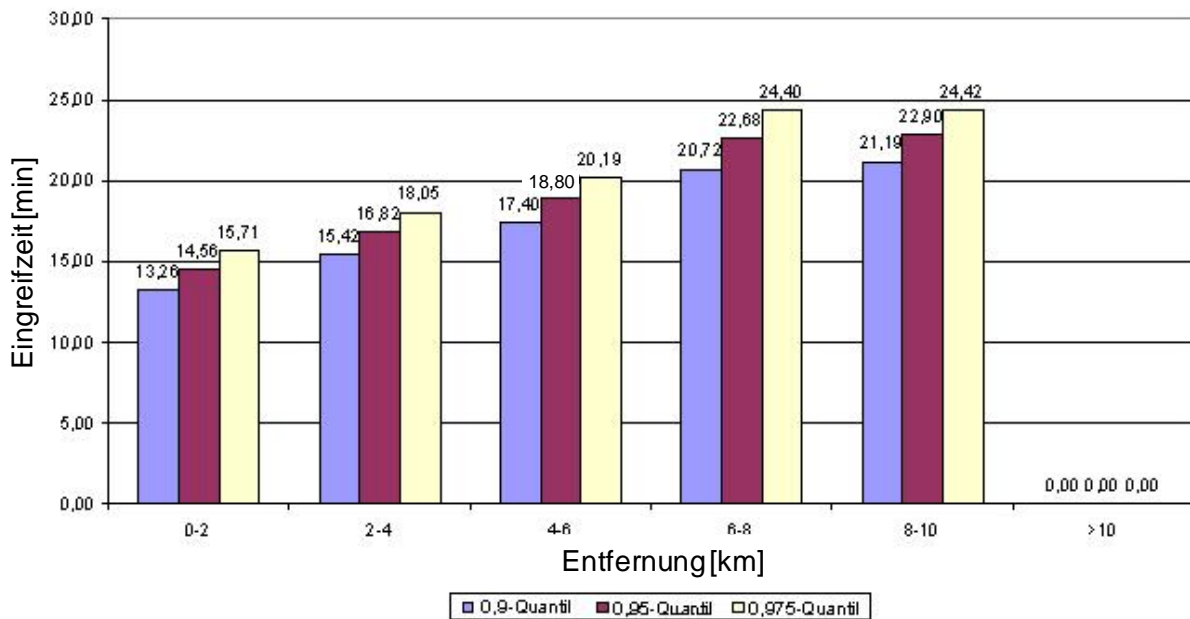


Bild 7.16 Quantile der Eingreifzeit in Abhängigkeit der Entfernung von der Feuerwache zum Brandort

Je nachdem, welche Randbedingungen bezüglich der Brandmeldung vorliegen, kann die Brandentwicklungsdauer ermittelt werden. Eine allgemeingültige Verwendung der p-Quantile im Sicherheitskonzept setzt eine umfassende Brandstatistik voraus.

Ist die Brandausbreitungsgeschwindigkeit näherungsweise bekannt, kann die zum Zeitpunkt des Eingreifens der Feuerwehr erreichte Brandfläche aus den Angaben zu Alarmierungszeiten und Hilfsfristen abgeschätzt werden.

7.6.1.4 Vereinfachtes Löschmodell

Wenn im Einzelfall, in Abstimmung mit der zuständigen Stelle, die Löschwirkung der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr im Rahmen von Brandsimulationen berücksichtigt werden soll, kann das nachfolgend beschriebene vereinfachte Löschmodell herangezogen werden.

Es geht davon aus, dass sich der Brand bis zum Zeitpunkt t_{act} (Beginn der Löschmaßnahme) rechnerisch ungestört ausbreitet und die Brandfläche $A_F(t_{act})$ erreicht. Bei bestimmten Brandmodellen (wie dem t^2 -Brandmodell) wird eine „äquivalente Brandfläche“ ermittelt und verwendet.

Das einwirkende Löschmittel stoppt sofort die weitere Brandausbreitung und begrenzt die Brandfläche auf den Wert $A_F(t_{act})$. Dabei darf ein festgelegter Grenzwert für die Beherrschbarkeit des Brandszenarios nicht überschritten werden. Als Grenzkriterium dient die „maximal beherrschbare Brandfläche“ $A_{F,max}$.

Für die Wirksamkeit der Löschmaßnahme lässt sich dann folgende Grenzzustandsbedingung formulieren:

$$A_F(t_{act}) < A_{F,max} \quad (7.10)$$

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

Die beherrschbare Brandfläche $A_{F,max}$ hängt insbesondere von der Wahl und Auslegung bzw. von den charakteristischen Leistungsmerkmalen der Brandbekämpfungsmaßnahme, d. h. im Wesentlichen von folgenden Parametern, ab:

- Menge und Eignung des Löschmittels, das in das Brandgeschehen löschwirksam eingebracht werden kann, sowie
- Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit dieser Maßnahme.

Es wird angenommen, dass auf der Brandfläche $A_F(t_{act})$ der Abbrand zunächst weiter mit der zum Zeitpunkt t_{act} erreichten Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{max}(t_{act})$ stattfindet. In dieser Phase bis zur Kontrolle des Brandes zum Zeitpunkt t_{con} wird eine Reduktion der Wärmefreisetzungsrate durch die Löschwirkung der Brandbekämpfung (auf der sicheren Seite liegend) vernachlässigt.

Es wird jedoch davon ausgegangen, dass aufgrund der Löschwirkung der Anteil der auf der Brandfläche $A_F(t_{act})$ abbrennenden Brandlast auf $Q_{F,red}$ reduziert wird.

Die Löschwirkung LW nimmt ab, wenn sich die Brandfläche $A_F(t_{act})$ der maximal beherrschbaren Brandfläche $A_{L\ddot{o}sch,max}$ nähert:

$$LW = 1 - A_F(t_{act}) / A_{F,max} \quad (7.11)$$

Die reduzierte Brandlast $Q_{F,red}$ kann mit Gleichung (7.12) abgeschätzt werden:

$$Q_{F,red} = (1 - LW^2) \cdot Q_F(A_F) \quad \text{in kWh} \quad (7.12)$$

Die reduzierte Brandlast wächst mit zunehmender Aktivierungszeit t_{act} und demzufolge größer werdender Brandfläche $A_F(t_{act})$. Umgekehrt können Brandbekämpfungsmaßnahmen, die zuverlässig bereits bei kleinen Brandflächen ihre volle Wirkung entfalten, die Menge der umsetzbaren Brandlast und entsprechend auch den Bemessungsbrand stark verringern (Bild 7.17).

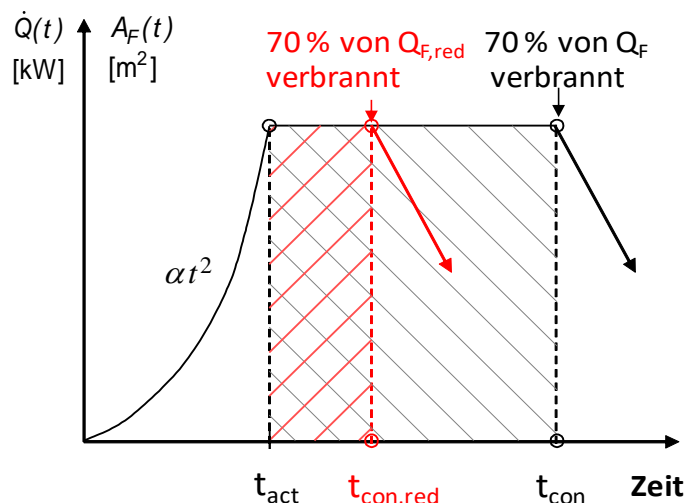


Bild 7.17 Berücksichtigung der Löschwirkung der Brandbekämpfung bei der Festlegung des Bemessungsbrandes.

Bei rechnerischen Untersuchungen werden im Allgemeinen konservative Annahmen getroffen, um die tatsächlichen Brandgefahren nicht zu unterschätzen. Die Annahmen und Ansätze des beschriebenen Modells gelten für Brände, die sich vorzugsweise in der Fläche ausbreiten und durch die Brandfläche $A_F(t)$ charakterisiert werden können. Andere Brände müssen sich

wegen der „Versagenskriterien“ der Löschmaßnahmen auf „äquivalente Flächenbrände“ umrechnen lassen. Diese Annahmen gelten nicht für Regal- oder Hochregalbrände, die sich vorzugsweise in der Höhe entwickeln und besondere Brandbekämpfungs-Maßnahmen erfordern.

Der Zeitpunkt für den Beginn der Löschmaßnahme (das Löschmittel erreicht das Brandgut) ist als t_{act} bekannt (er wurde berechnet oder festgelegt bzw. vereinbart).

Für das Szenario eines quantifizierten „kritischen“ Wohnungsbrandes werden heute über die Auswertung von Schadenerfahrungen unter anderem folgende Werte angegeben [7.36], [7.37]:

- 80% aller Wohnungsbrände können mit bis zu 1.000 l (min. 800 l) und bis zu 90% mit ca. 2.300 l Wasser gelöscht werden.
- 25% aller Brände werden über die Erschließung zusätzlicher Wasserentnahmestellen mit ausreichender Wasserlieferung (DVGW 405 - 300m Umkreis) gelöscht.
- die Zeitdauer einer Brandbekämpfung ohne zusätzliche Wasserversorgung beträgt im Mittel 5 bis 6 min.

7.6.2 Zuverlässigkeit von Löschmaßnahmen

Das nachfolgend beschriebene Modell dient zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit von Löschmaßnahmen durch Feuerwehren in Abhängigkeit der Brandfläche.

Dem Modell liegt eine einfache Grenzzustandsgleichung zugrunde, in der die mit der Branddauer größer werdende Brandfläche A_F mit der maximal beherrschbaren Brandfläche $A_{F,max}$ verglichen wird (Gleichung 7.13).

$$Z = A_{F,max} - A_F(t_{act}) = A_{F,max} - \pi \cdot (v_{aus} \cdot t_{act})^2 \quad (7.13)$$

Zur Ermittlung der sich einstellenden Brandfläche A_F wird der international akzeptierte Ansatz zur Brandentwicklung ($\alpha \cdot t^2$ Ansatz) umgeformt, indem dem Kennwert für die Brandentwicklung α ein Zahlenwert für die Brandentwicklungsgeschwindigkeit v_{aus} zugeordnet wird. In den Beispielrechnungen wurde die Brandentwicklungsgeschwindigkeit (v_{aus}) stellvertretend für eine mittlere Brandausbreitung zu $v_{aus} = 0,4$ m/min und für eine schnelle Brandausbreitung zu $v_{aus} = 1,0$ m/min angenommen. t_{act} ist die Zeit bis zum Beginn der Löscharbeiten.

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

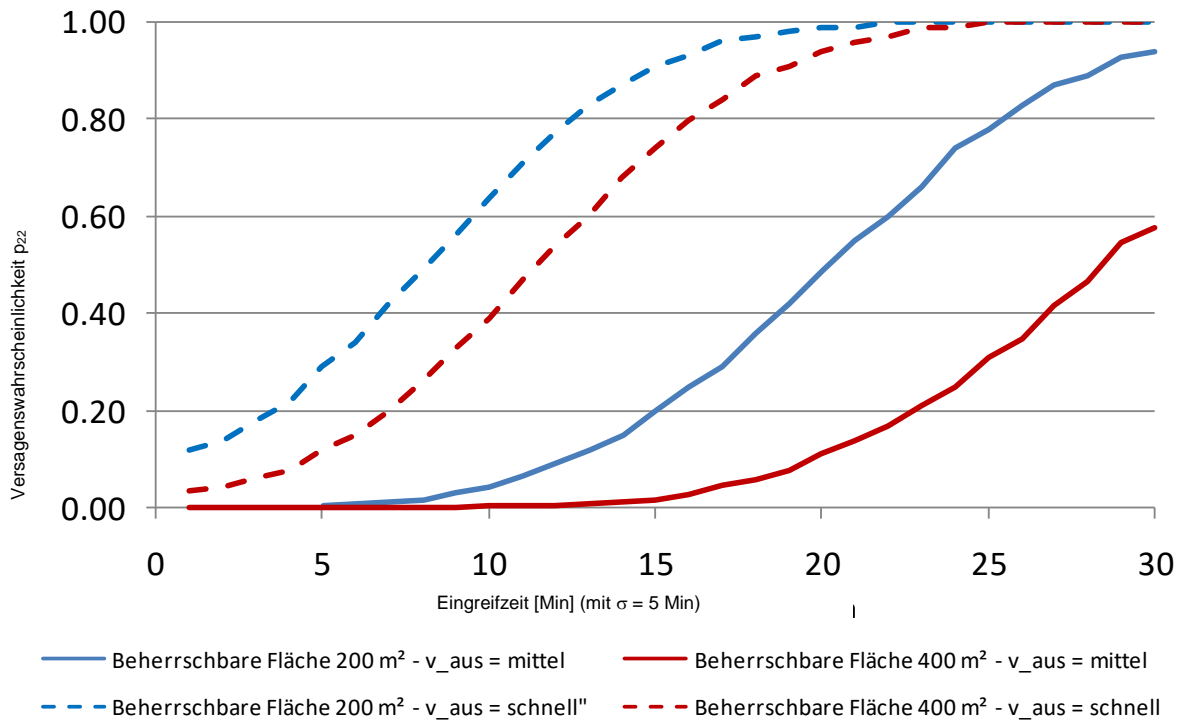


Bild 7.18 Versagenswahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr in Abhängigkeit von der Eingreifzeit und der maximal beherrschbaren Brandfläche

Angaben über die durch die Feuerwehr unter den jeweiligen Randbedingungen maximal beherrschbaren Brandflächen sind in der Literatur nicht zu finden. Bild 7.18 zeigt die Versagenswahrscheinlichkeiten für Löschmaßnahmen in Abhängigkeit der Eingreifzeit der Feuerwehr für zwei verschiedene maximal beherrschbare Brandflächen $A_{F,max}$ (200 m² / 400 m²). Diese Größe bietet die Möglichkeit, unterschiedlich leistungsfähige Feuerwehren, beispielsweise bedingt durch eine größere Anzahl verfügbarer Staffeln (Anzahl Einsatzkräfte und zugehöriges Gerät, wie insbesondere Anzahl der Pumpen und des Schlauchmaterials), zu berücksichtigen.

Tabelle 7.10 Stochastisches Modell der Eingangsgrößen

Parameter	Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Quelle
Brandausbreitungsgeschwindigkeit	v_{aus}	m/min	Gauß-Normal	0,4/ 1,0	0,06 / 0,15	0,15	gewählt
Kritische Brandfläche	$A_{F,max}$	m ²	Gauß-Normal	400/ 200	60 / 30	0,15	gewählt
Eingreifzeit	t_{act}	min	Gauß-Normal	10..30	5	0,17 – 0,50	gewählt

Den Ergebnissen, die mit Hilfe von FORM/SORM bzw. einer Monte-Carlo Simulation berechnet wurden, liegt bei der Eingreifzeit der Feuerwehr eine Standardabweichung $\sigma = 5$ min zugrunde, während bei der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und der beherrschbaren Brandfläche jeweils ein Variationskoeffizient $V = 0,15$ berücksichtigt wurde.

Die im Sicherheitskonzept des Anhangs BB von DIN EN 1991-1-2/NA enthaltenen Werte für p_{22} wurden auf Grundlage des hier beschriebenen Modells mit den angegebenen Eingreifzeiten ermittelt. Für die kritische Brandfläche wurde der mittlere Wert aus Tabelle 7.10 ($A_{f, \text{grenz}} = 200 \text{ m}^2$) zu Grunde gelegt.

7.6.3 Wirksamkeit von Löscharbeiten

Die Effektivität einer wirksamen Brandbekämpfung durch eine Feuerwehr kann auf der Basis der vfdb-Brandschadensstatistik (vgl. z. B. [7.38], [7.39], [7.40], [7.41], [7.42], [7.62]) nachgewiesen werden. Die Auswertung von 5.016 Einsatzberichten von 28 Feuerwehren mit insgesamt 1.216 echten Brandereignissen (Phase I und II) zeigt, dass es hier Unterschiede für Berufsfeuerwehren (BF), Freiwillige Feuerwehren (FF) und Werkfeuerwehren (WF) gibt. Auf der Basis der vfdb-Brandschadensstatistik liegen Informationen zu realen Gebäudebränden von der Brandentstehung und -ausbreitung, Alarmierung der Feuerwehr und den eingeleiteten (anlagentechnischen) Brandschutzmaßnahmen bis zur Erfassung der Brandschäden vor (vgl. Kapitel 7.2.5, Kapitel 7.3.5 und Kapitel 7.4.5). In dem vorliegenden Datenbestand sind die Freiwilligen Feuerwehren in Bezug auf die gemeldeten Fallzahlen unterrepräsentiert.

Tabelle 7.11 stellt die Datengrundlage dar, anhand derer die Wirksamkeit der Feuerwehrtart quantifiziert wird. Dieser Nachweis kann in das Sicherheitskonzept für ein Objekt einbezogen werden. Die Ergebnisse zeigen zum Beispiel, dass bei Werkfeuerwehren in 91 % der Fälle der Sachschaden kleiner 1.000 EUR ist, bei Freiwilligen Feuerwehren sind dies 60 % und bei Berufsfeuerwehren 56 %. Dagegen sind bei Berufsfeuerwehren in 10 % der Fälle die Sachschäden größer 10.000 und kleiner 100.000 EUR, während dieser Wert bei Freiwilligen Feuerwehren 8 % und bei Wehrfeuerwehren 2 % beträgt. In fast allen erfassten Bränden (96 %) bei denen eine Werkfeuerwehr alarmiert wurde, begrenzte sich der Brand auf einen Gegenstand. Dieser Anteil war bei den Brandfällen der Freiwilligen Feuerwehr (71 %) und der Berufsfeuerwehr (67 %) deutlich geringer. Berufs- und Freiwillige Feuerwehr zeigen somit die gleichen Tendenzen hinsichtlich der Brandausbreitung. Die Rauchausbreitung ist ebenso nicht nennenswert in 91 % der Fälle bei Bränden in denen eine Werkfeuerwehr alarmiert wurde, bei Freiwilligen Feuerwehren in 36 % der Fälle und bei Berufsfeuerwehren in 29 %. Die Rauchausbreitung über ein oder mehrere Geschosse zeigt bei Berufs- und Freiwilligen Feuerwehren ähnliche Werte mit 7 bzw. 5 %, während hier bei Werkfeuerwehren mit nur einem Fall (ein Geschoss) bzw. 1 % (mehrere Geschosse) die Rauchausbreitung stark begrenzt ist. Hier zeigt sich, dass vergleichbar mit dem Brandausmaß, die Ausbreitung von Rauch bei Einsätzen der Berufsfeuerwehr und der Freiwilligen Feuerwehr ähnlich und anteilmäßig größer ist, als bei Bränden die von Werkfeuerwehren erfasst wurden. Die genannten Ergebnisse korrelieren auch mit der in der Regel vorhandenen kürzeren Hilfsfrist einer Werkfeuerwehr gegenüber einer öffentlichen Feuerwehr.

Aus der Auswertung zum Erfassungskriterium „Löschwasser-Einsatz“ lassen sich keine weiteren Schlüsse bezüglich des eingesetzten Löschmittels Wasser (z. B. Wirksamkeit von Wasser als Löschmittel beziehungsweise Wirksamkeit von Wasser, je nach Einsatz durch Werk- oder öffentlichen Feuerwehren) ableiten, weil im zu Grunde liegenden Erfassungsbogen nur singulär der Einsatz von Wasser abgefragt wurde, nicht aber beispielsweise der Einsatz alternativer Löschmittel oder etwa der Löschmittelzusatz von Netzmittel beziehungsweise Schaumbildnern.

Tabelle 7.11 Auswertung von Brandschadenskriterien in Abhängigkeit der Art der Feuerwehr (BF: Berufsfeuerwehr, FF: Freiwillige Feuerwehr, WF: Werkfeuerwehr; Quelle: vfdb-Brandschadenstatistik [7.62]; Phase I und II mit 5.016 Gebäudebrandeinsätzen von 28 Feuerwehren, inkl. 1.216 tatsächlichen Bränden; vgl. [7.38], [7.39] und [7.41])

Erfassungskriterium		Brandfälle			Anteil			
		BF [ANZ.]	FF [ANZ.]	WF [ANZ.]	BF [%]	FF [%]	WF [%]	
Sachschaden	< 1.000 EUR	383	125	220	56	60	91	
	< 10.000 EUR	125	57	6	18	28	2	
	< 100.000 EUR	69	16	4	10	8	2	
	< 500.000 EUR	11	1	0	2	0	0	
	< 1.000.000 EUR	1	1	0	0	0	0	
	> 1.000.000 EUR	0	2	0	0	1	0	
	Keine Angabe möglich	98	5	12	14	2	5	
	Summe	687	207	242	100	100	100	
Brandausmaß	Gegenstand	485	156	238	67	71	96	
	Raum	163	35	5	22	16	2	
	Mehrere Räume	23	9	3	3	4	1	
	Wohnung	14	1	0	2	0	0	
	Geschoss	11	4	1	2	2	0	
	Mehrere Geschosse	7	4	0	1	2	0	
	Brandabschnitt	7	3	0	1	1	0	
	Mehrere Brandabschnitte	1	2	0	0	1	0	
	Treppenraum	3	2	1	0	1	0	
	Gesamtgebäude	14	3	0	2	1	0	
	Weitere Gebäude	1	1	0	0	0	0	
		Summe	729	220	248	100	100	100
Rauchausbreitung	Nicht nennenswert	228	86	222	29	36	91	
	Raum, Schacht	160	56	12	20	24	5	
	Wohnung	192	39	1	25	17	0	
	Geschoss	57	16	1	7	7	0	
	Treppenraum	72	15	2	9	6	1	
	Flur	31	12	4	4	5	2	
	Mehrere Geschosse	41	12	2	5	5	1	
		Summe	781	236	244	100	100	100
	Rauchsichtung erkennbar	107	114	5	--	--	--	
Rettungsweg benutzbar?	460	165	164	--	--	--		
LW-Einsatz	Kein Löschwasser	326	85	66	45	40	28	
	< 500 L	270	72	163	38	34	68	
	< 2500 L	85	39	7	12	19	3	
	> 2500 L	39	14	4	5	7	2	
		Summe	720	210	240	100	100	100

Insgesamt zeigen die Ergebnisse aus Tabelle 7.11, dass sich die Schadenverteilungen bei den Werkfeuerwehren von denen der Berufs- und Freiwilligen Feuerwehren unterscheiden, während die Verteilungen zwischen den Berufs- und Freiwilligen Feuerwehren hohe Ähnlich-

keiten aufweisen. Unterschiede ergeben sich in diesem Zusammenhang durch die unterschiedlichen strukturellen Einsatzspektren der Berufs- und Freiwilligen Feuerwehren (z. B. Aufkommen von Hochhäusern und Mehrfamilienhäusern). Da die Gemeinden gemäß den länderspezifischen Vorgaben sowie des Brandschutzbedarfsplanes eine den örtlichen Verhältnissen entsprechend leistungsfähige öffentliche Feuerwehr vorhalten muss, sind erwartungsgemäß keine wesentlichen Unterschiede in der Tabelle 7.11 zwischen Berufs- und Freiwilliger Feuerwehr abzulesen.

7.6.4 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch besonders wirksame Löschmaßnahmen

Die Möglichkeit der Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch besonders wirksame Maßnahmen zur frühzeitigen Brandbekämpfung lässt sich mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeitsberechnung genauer untersuchen (vgl. Kapitel 10). Hierzu müssten jedoch belastbare Daten für die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit im Anforderungsfall vorliegen. Da dies nur sehr eingeschränkt der Fall ist, wird von einer expliziten Berücksichtigung der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr im Brandszenario in der Regel abgesehen. Stattdessen kann auf Grund einer Auswertung von Brandstatistiken verschiedener Feuerwehren davon ausgegangen werden, dass sich lediglich 10 % der Entstehungsbrände zu einem Großbrand mit größeren Schadensfolgen ausweiten [7.24].

Eine Differenzierung dieser pauschalen „Ausfallwahrscheinlichkeit“ der manuellen Brandbekämpfung nach der Leistungsfähigkeit der zuständigen Feuerwehr ist in Ermangelung brandstatistischer Daten kaum möglich. Daher beschränkt sich die „Kompensation“ auf eine pauschale Reduktion der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers im semi-probabilistischen Sicherheitskonzept für die Brandschutzbemessung mit einem Naturbrandmodell nach DIN EN 1991-1-2/NA [7.25].

Unstrittig ist hingegen die wirksamere Brandbekämpfung durch eine anerkannte Werkfeuerwehr im Bereich des Industriebaus [7.26]. Sie wird seit vielen Jahren bei der Brandschutzbemessung nach DIN 18230-1 [7.2] über den Beiwert α_L für die brandschutztechnische Infrastruktur berücksichtigt und kann bei entsprechender Stärke der Werkfeuerwehr (4 Staffeln) zu einer vergleichbaren Abminderung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer wie durch eine automatische Feuerlöschanlage führen (vgl. Kapitel 7.3.6).

7.7 Literatur

- [7.1] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (M IndBauRL), Fassung Mai 2019.
- [7.2] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Ausgabe September 2010.
- [7.3] DEHNE, M.: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig, Heft 169 (2003).
- [7.4] DEHNE, M.: Ein übergreifendes Sicherheitskonzept für den vorbeugenden Brandschutz, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig, Heft 168 (2003), S. 11 - 40.

- [7.5] DEHNE, M.; VAN LIER, M.: Zusammenwirken von baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen. vfdb-Jahresfachtagung 2004, Essen, 2004.
- [7.6] VFDB: Risikoangepasste Reaktion der Feuerwehren auf automatische Meldungen aus Brandmelde- und Sprinkleranlagen. Entwurf einer vfdb-Richtlinie, Fassung März 2002.
- [7.7] BREINIG, H. W.; RIOTTE, H. G.: Statistische Auswertungen zur Brandeintrittshäufigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Abschlussbericht zur Studie – Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken. Fachband 1. Teil B, Köln, September 1985.
- [7.8] VdS Schadenverhütung: Jahresbericht 1979, Köln, 1979.
- [7.9] REINTSEMA, J.: Brandschutz im Krankenhaus. Dissertation, Medizinische Hochschule Hannover, 2000.
- [7.10] Vereinigung Kantonalen Versicherungen: Alarmstatistik BMA. Übersicht der echten und unechten Alarme. Bern. Auswertung 1996 - 2000, Bern, Ausgabe Dezember 2001
- [7.11] REINTSEMA, J.; STAIMER, A.; Bedeutung komplexer Brandmeldesysteme im Rahmen von Brandschutzkonzepten; Praxisseminar Brandschutz in Sonderbauten, Braunschweig 2006.
- [7.12] VdS CEA 4001: Richtlinien für Sprinkleranlagen. Planung und Einbau.
- [7.13] HOSSER, D.; DOBBERNACK, R.; SIEGFRIED, W.: Rauchabzug in ausgedehnten Räumen ohne und mit Sprinkleranlage – am Beispiel des Industriebaus. vfdb, 46. Jahrgang, 4 / 97, S. 147 - 152.
- [7.14] VdS Schadenverhütung: Jahresbericht 1990 / 91, Köln, 1991.
- [7.15] NASH, P.; YOUNG, R. A.: Automatic Sprinkler Systems for Fire Protection. 2nd Edition, Paramount Publishing, 1991.
- [7.16] SCHUBERT, K.-H.: Problemanalyse zur Berechnung von Löschflächen unter Berücksichtigung der im Industriebau vor allem bei eingeschossigen Hallen anzutreffenden Gegebenheiten in Abhängigkeit der Kräfte und Mittel der Feuerwehren. Dissertation, Berlin, Juli 1979.
- [7.17] Fire Engineering Guidelines. Australian Building Codes Board (ABCB), Australian Fire Authorities Council (AFAC), The Institution of Engineers, Australia (IEAust), 1996.
- [7.18] STAIMER, A.; KLEIN, W.; MONTRONE, F.: Hochwertige Systeme als Voraussetzung für höchste Verfügbarkeit; vfdb-Zeitschrift 1/2007.
- [7.19] MADRZYKOWSKI, D.; VETTORI, R.: A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System. NISTIR 4833, U.S. Department of Commerce, 1992, USA.
- [7.20] EVANS, D.: Sprinkler Fire Suppression Algorithm for Hazard. NISTIR 5254, 1993, U.S. Department of Commerce, Technology Administration, USA.

- [7.21] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth Edition, Quincy, Massachusetts (USA), 2008.
FLEMING, R.: Automatic Sprinkler System Calculations.
- [7.22] NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems. NFPA, 1994, Quincy MA (USA).
- [7.23] DIN 14011:2010-06, Begriffe aus dem Feuerwehrwesen.
- [7.24] SCHNEIDER, U.; HOSSER, D: Statistische Ermittlung der Brandhäufigkeit in mehrgeschossigen Wohngebäuden. Abschlussbericht im Auftrag des Instituts für Bautechnik (Az. IV/1-5-383/83). Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Baustoffkunde, 1984.
- [7.25] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [7.26] SCHNEIDER, U.; HOSSER, D.; KERSKEN-BRADLEY, M.: Statistische Ermittlung der Brandentstehungshäufigen und –ausbreitungswahrscheinlichkeit in Industriegebäuden. Abschlussbericht im Auftrag des Instituts für Bautechnik (Az. IV/1-5-460/86). Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Baustoffkunde, 1984.
- [7.27] FESTAG, S. (1/2016). False Alarm ratio of Fire Detection and Fire Alarm Systems in Germany – A meta Analysis. Fire Safety Journal, 79, 119-126. doi:10.1016/j.firesaf.2015.11.010)
- [7.28] FESTAG, S. et al. (2018). False Alarm Study: False Alarm Data Collection and Analysis from Fire Detection and Fire Alarm Systems in Selected European Countries. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- [7.29] STAIMER, A., FESTAG, S. , MÜNZ, F. (8/2012). Verfügbarkeit von Brandmeldeanlagen. Wie sicher sind Brandmeldeanlagen? (Technischer Bericht, ZVEI-Merkblatt 33009:2012-08), Frankfurt am Main: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie.
- [7.30] FESTAG, S., LIPSCH, C. (03/2019). Empirische Untersuchung der statistischen Verfügbarkeit von automatischen Brandmeldeanlagen. Vortrag, 5th. Magdeburg Day of Fire and Explosion Safety, 25.-26.03.2019. Magdeburg: Universität Magdeburg.
- [7.31] BIROLINI, A. (1997). Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen. Heidelberg: Springer Verlag.
- [7.32] FACHARBEITSKREIS PROBABILISTISCHE SICHERHEITSANALYSE FÜR KERNKRAFTWERKE (Hrsg.): Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Schriften / Bundesamt für Strahlenschutz. Stand: August 2005. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, 2005 – ISBN 978-3-86509-415-5.
- [7.33] SCHLOSSER, I., STAHL, K.-H. (26. August 1997). Ermittlung von Sicherheitsfaktoren bei Gaslöschanlagen mittels analytischer Methoden. (VdS, Hrsg.) Köln, NRW, Deutschland.
- [7.34] HIMMELBAUER, H., TREYLT, A. (Sommer 1996). Fehlerbaumanalyse; Fault Tree Analysis (FTA). Wien, Österreich.

- [7.35] FÖHL, A. C.: „Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen – Versuche“, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Februar 2005.
- [7.36] TRETTER, L.: „Leistungsorientierte Ermittlung von Kräften und Mitteln als Grundlage für Einsatzunterlagen im abwehrenden Brandschutz“, Masterarbeit an der TH Köln, Studiengang Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr – Studienrichtung Brandschutzingenieurwesen, Köln, 19. März 2019.
- [7.37] HOFFMANN, M.: „Effektivität einer Feuerwehr - Zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit einer Feuerwehr mittels quantitativer Kenngrößen“, Masterarbeit an der TH Köln, Studiengang Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr – Studienrichtung Brandschutzingenieurwesen, Köln, 06. September 2016.
- [7.38] FESTAG, S. , HEGGER, T. (7/2017). vfdb-Brandschadenstatistik. URL: <http://www.ref14.vfdb.de/brandstatistik> (Erstellungsdatum: 28.07.2017).
- [7.39] HEGGER, T. (9/2014). Entwicklung einer nationalen Brandschadenstatistik. In: Zehfuß, J. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2014. 28. Fachtagung Brandschutz und Sonderbauten (S. 261-272), 16.-17. September 2014, Heft 224.
- [7.40] FESTAG, S. (09/2015). Ergebnisse zur Erhebung der Brandschadenstatistik. In: Zehfuß, J. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2015. 29. Fachtagung Brandschutz bei Sonderbauten (S. 227-248), Heft 227.
- [7.41] FESTAG, S. (2018). Exemplarische Ergebnisse für einen Überblick und Sachstand zur Untersuchung der Wirksamkeit von anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen. Technische Sicherheit, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag.
- [7.42] FESTAG, S. (9/2017). Statistical analysis of the effectiveness of fire protection system technologies – Extract from the project survey phases I of the German fire loss statistic. In Thorsten Schultze (Hrsg.), Proceedings, 16th International Conference on Automatic Fire Detection, 12.-14. September 2016, Maryland (S. I-51-I-62), Duisburg: Universität Duisburg-Essen.
- [7.43] VDI 6019 Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Blatt 1 und Blatt 2.
- [7.44] VdS Schadenverhütung (2019) – Prüfprotokolle punktförmiger Rauchmeldern nach dem Streulichtprinzip zu Normbränden TF2 (Holz) und TF5 (n-Heptan) nach DIN EN 54-7:2006-09, Anhang ZA, Köln, unveröffentlicht.
- [7.45] EVANS, D. D.: Ceiling Jet Flows in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Section 2/Chapter 4, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995.
- [7.46] Forschungsprojekt „Innovative Sicherheitsarchitektur der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr (TIBRO)“, 04/2012-06/2015, https://www.sifo.de/files/Projektumriss_TIBRO.pdf, Zugriff 10.06.2019

- [7.47] FAMERS, G., MESSERER, J.: „Rettung von Personen“ und „wirksame Löscharbeiten“ - bauordnungsrechtliche Schutzziele mit Blick auf die Entrauchung - Ein Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht, 2008, <https://www.bauministerkonferenz.de/Dokumente/42311831.pdf>, Zugriff 10.06.2019
- [7.48] DIN 14675 Brandmeldeanlagen, Teile 1 und 2
- [7.49] DIN VDE 0833 Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall, Teile 1 – 4
- [7.50] DIN EN 54 Brandmeldeanlagen, Teile 1 – 32
- [7.51] DIN EN 12101-2 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte
- [7.52] DIN 18232-2 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau
- [7.53] VdS 2098 VdS-Richtlinien für natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (NRA), Planung und Einbau
- [7.54] DIN EN 12101-3 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 3: Bestimmungen für maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsgeräte
- [7.55] DIN 18232-5 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung
- [7.56] DIN EN 12101-6 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 6: Festlegungen für Differenzdrucksysteme, Bausätze
- [7.57] DIN EN 12101-13 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 13: Projektierung, Einbau, Abnahmen und Instandhaltung von RDA
- [7.58] VDMA 24188 Rauchschutzmaßnahmen in Treppenträumen – Rauchableitung, Rauchverdünnung, Rauchfreihaltung
- [7.59] DIN 18232-4 Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 4: Wärmeabzüge (WA); Prüfverfahren
- [7.60] DIN 18232-7 Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 7: Wärmeabzüge aus schmelzbaren Stoffen; Bewertungsverfahren und Einbau
- [7.61] Verband der TÜV e. V., Baurechtsreport 2016
- [7.62] FESTTAG, S.; DÖBBELING, E.-P.: vfdb-Brandschadenstatistik – Untersuchung der Wirksamkeit von (anlagentechnischen) Brandschutzmaßnahmen. Technischer Bericht 14-01, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 14, Münster (in Bearbeitung zur Veröffentlichung 2020).

8 PERSONENSICHERHEIT IN RETTUNGSWEGEN

8.1 Nachweiskriterien für die Personensicherheit

Als Nachweiskriterien für die Personensicherheit stehen zur Verfügung:

- 1) die Höhe der raucharmen Schicht,
- 2) die Qualität der raucharmen Schicht, insbesondere
 - 2.1 die optische Dichte pro Weglänge bzw. die Erkennungsweite (Kapitel 8.2 und 8.3),
 - 2.2 die Auswirkungen toxischer Gase (Kapitel 8.4) und
- 3) thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion (Kapitel 8.5).

1) Höhe der raucharmen Schicht

Das offensichtlichste und am einfachsten nachvollziehbare Kriterium ist die Höhe der raucharmen Schicht. Zur Selbstrettung sind je nach Stärke der Stratifizierung, Raumhöhe und erforderlicher Sicherheitszuschläge typischerweise Schichthöhen von mindestens 2,5 m nachzuweisen [8.31], nur in Ausnahmefällen auch geringer. Die Höhe der raucharmen Schicht ist ein wesentlicher Ausgabeparameter von Zonenmodellen. CFD-Modelle geben den Parameter auf Grund von Auswertungen des Schichtungsverlaufs über die vertikale Koordinatenachse aus, wobei auch der Einfluss von Raumströmungen berücksichtigt werden kann. Die Höhe der raucharmen Schicht ist im Allgemeinen ein konservatives, früh anschlagendes Kriterium für die Personensicherheit [8.32], welches allein auf physikalischen Phänomenen und nicht auf Betrachtungen zu (individuellen) Schadenswirkungen basiert.

2) Qualität der raucharmen Schicht

Um die Ausdehnung einer raucharmen Schicht nachzuweisen, sind gegebenenfalls Nachweise für die Qualität der raucharmen Schicht erforderlich. Dies gilt insbesondere in Fällen mit geringer Stratifizierung, in denen Rauchgasanteile in die raucharme Kaltgasschicht gelangen, bei Entrauchungskonzepten, die auf Rauchverdünnung basieren (z. B. in Garagen oder Tunnel) oder bei sehr konservativen Brandszenarien. In die Bewertung der *optischen Dichte pro Weglänge* bzw. *Erkennungsweite* gehen neben physikalischen Aspekten auch lichttechnische und chemische Überlegungen ein. Je nach Höhe der zu erkennenden Objekte im Raum kann das Kriterium Erkennungsweite auch noch vor der Höhe der raucharmen Schicht anschlagen [8.32]. In die Bewertung der Brandgastoxizität gehen physikalische, chemische und physiologische Aspekte ein. Nachweiskriterien zur Toxizität sind nicht konservativ. Sie dürfen nur in wohl begründeten Fällen bzw. bei sehr konservativen Szenarien verwendet werden. Das einfache Ersetzen von konservativen Kriterien wie der raucharmen Schichthöhe durch Toxizitätsnachweise würde zu einer Herabsetzung des Sicherheitsniveaus führen. Der Vorteil der Verwendung von Toxizitätsnachweisen liegt darin, dass sie auf Grund der Berücksichtigung chemischer und physiologischer Aspekte prinzipiell am besten zur Risikoquantifizierung geeignet sind.

3) Thermische Einwirkungen

Die thermischen Wirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion sind insbesondere im Flammennahbereich sowie eventuell hinsichtlich der Heißgasschicht zu betrachten. In die Berechnung gehen vor allem physikalische Aspekte ein.

Da die Einwirkungen der Nachweiskriterien 2 und 3 lokal stark schwanken, erfordert die Berechnung der Kriterien sinnvollerweise die Verwendung von CFD-Modellen. Bei den Kriterien 2 und 3 ist die Schadwirkung auf den Menschen abhängig von der Expositionsdauer. Da die Einwirkungen typischerweise mit dem Brandverlauf zunehmen, nimmt die Schadwirkung (Dosis) beim Menschen überproportional zu (vgl. Bild A2.3). Die Verwendung von Dosismodellen wie z. B. FED (Gl. (8.11)) oder $FED_{\text{thermisch}}$ (Gl. (8.17)) bildet deshalb die Grundlage für die Festlegung quantitativer Akzeptanzkriterien und entsprechender Beurteilungswerte (wie z. B. in Tabelle 8.2) und ist bei Risikobetrachtungen daher vorzuziehen.

8.2 Lichttrübende Wirkung des Rauches

Bei der Bewertung der von einem Brand ausgehenden Gefahren spielt das Ausmaß der Ver Rauchung und die damit einhergehende Reduktion der Erkennungsweite eine wesentliche Rolle. In Vereinfachung der komplexen Vorgänge bei der Entstehung und Ausbreitung von Rauch lässt dieser sich als ein Medium beschreiben, welches zunächst im Bereich der Verbrennungszone erzeugt und durch die auftriebsbehafte Konvektionsströmung transportiert wird, gegebenenfalls beeinflusst von Ventilationsströmungen, die durch Gebäudeöffnungen oder mechanische Ventilationsysteme hervorgerufen werden. Unter dem Begriff „Rauch“ ist im Weiteren das Aerosol aus festen Partikeln, sich daran anlagernden schwerflüchtigen Stoffen und gasförmigen Produkten zu verstehen.

Die lichttrübende Wirkung des Rauches wird durch die optische Dichte pro Weglänge D_L oder den Extinktionskoeffizienten (Schwächungskoeffizient) K quantifiziert. Beide Größen beschreiben den gleichen physikalischen Sachverhalt, unterscheiden sich jedoch in ihrer mathematischen Formulierung (negativer dekadischer bzw. natürlicher Logarithmus der relativen Lichttransmission geteilt durch die Weglänge), wodurch sich ein Umrechnungsfaktor

$$D_L = \frac{K}{\ln(10)} \approx 0,43 \cdot K \quad (8.1)$$

ergibt. Da beide Größen die gleichen physikalischen Einheiten besitzen (m^{-1}), muss bei der Anwendung entsprechender Daten sorgfältig auf die zu Grunde liegende Definition geachtet werden. Mitunter wird die Rauchdichte pro Weglänge auch in der Einheit db/m , genannt Obscura (Ob) angegeben, wobei gilt $D_L [Ob] = 10 \times D_L [m^{-1}]$. Unter dem Begriff "Rauchdichte" ist nachfolgend die optische Dichte pro Weglänge D_L des Rauches zu verstehen.

Wichtig für die Anwendung in Nachweisverfahren ist der Zusammenhang zwischen Rauchdichte und Massenkonzentration des Rauches (Rauchpartikel-Beladung) $c_{Ru\ddot{a}f}$.

$$D_L = D_m \cdot c_{Ru\ddot{a}f} / Y_{Ru\ddot{a}f} \quad (8.2)$$

8 Personensicherheit in Rettungswegen

Die Größe D_m wird als Rauchpotential (bezogen auf die optische Dichte pro Weglänge) bezeichnet, nach DIN EN ISO 5659-1 auch als massebezogene optische Dichte (englisch: mass optical density) MOD. $Y_{\text{Ruß}}$ ist der Rauchpartikel-Entstehungsanteil am Brandgut, auch Rauch- oder Rußausbeute genannt. Im Englischen findet man dazu die Ausdrücke *smoke yield*, *soot yield* oder *smoke mass conversion factor*.

Als Anteil an der gesamten durch Verbrennung freigesetzten Masse ist die Ausbeute Y eines Verbrennungsproduktes in der Form [g/g] (Verhältnis Masse Verbrennungsprodukt zu Masse verbrannten Brennstoffs) angegeben.

Bezieht man das Rauchpotential auf den Extinktionskoeffizienten, muss entsprechend auch das Rauchpotential mit dem Faktor $\ln(10)$ multipliziert werden.

Alternativ zum Rauchpotential lassen sich D_L bzw. K auch aus dem massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m und der Rauchpartikeldichte berechnen, wobei in letztere die Rauchausbeute $Y_{\text{Ruß}}$ eingeht,

$$D_m = K_m \cdot Y_{\text{Ruß}} / \ln(10) \quad (8.3)$$

mit einem typischen Wert für die flammende Verbrennung von Mischbrandlasten (Holz, Kunststoff) für K_m von $8,7 \pm 1,1 \text{ m}^2/\text{g}$ [8.5]. Der Vorteil bei der Verwendung des Rauchpotentials D_m gegenüber K_m liegt darin, dass in D_m die Abhängigkeit der Rauchtrübung vom Brennstoff direkt enthalten ist, wogegen diese bei K_m erst durch die Kombination mit $Y_{\text{Ruß}}$ zum Ausdruck kommt. Weiterhin hängt die Rauchtrübung auch vom Ablauf der Verbrennung (Luftzufuhr, Flammenbildung) ab. Brandphasen ohne Flammenbildung zeigen in der Regel ein deutlich höheres Rauchpotential. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass in diesem Fall die Abbrandrate – und damit auch die Raucherzeugung – wesentlich niedriger ist als bei Bränden mit Flammen und entsprechend hohen Wärmefreisetzungsraten.

8.3 Erkennungsweite von Sicherheitszeichen

Die Erkennungsweite - definiert als der Abstand zwischen Beobachter und Sehzeichen, bei dem dieses gerade noch erkannt werden kann - ist eine komplexe, von vielen Einflussfaktoren (Eigenschaften und Dichte der Rauchpartikel, Ausleuchtung des Raumes, Eigenschaften des wahrzunehmenden Objektes, Blickwinkel, individuelle Personeneigenschaften, Augenreizung durch Brandgase etc.) abhängige Größe. Häufig wird diese auch vereinfacht als „Sichtweite“ bezeichnet.

Die Auswertung von Rauchversuchen zeigt, dass ein im Wesentlichen reziproker Zusammenhang zwischen Rauchdichte und Erkennungsweite besteht. Studien zur Auswirkung von Rauch auf Personen [8.1], [8.2], [8.3] führten zur Aufstellung der folgenden Beziehungen:

$$S = \frac{C}{K} \text{ für nichtreizenden Rauch bzw. reizenden Rauch mit } K < 0,25 \text{ m}^{-1} \quad (8.4)$$

und

$$S = \frac{C}{K} \cdot [0,133 - 1,47 \cdot \log(K)] \text{ für reizenden Rauch mit } K \geq 0,25 \text{ m}^{-1} \text{ und } S > 0. \quad (8.5)$$

Die Messdaten in den Versuchen von Jin liegen in einem Abstand von Betrachter zu erkennendem Objekt zwischen 5 m und 15 m. Die zu beobachtenden Werte für die Konstante C hängen bei hinterleuchteten (von einer internen Lichtquelle beleuchtet) Zeichen neben der Rauchzusammensetzung stark von der Leuchtdichte ab, wobei Werte zwischen 5 und 10 beobachtet wurden. Bei (von einer externen Lichtquelle) beleuchteten Zeichen wurden, je nach Reflexionsgrad der Schilder, Werte zwischen 2 und 4 festgestellt. Es werden in der Praxis häufig die bereits von Jin angegebenen Mittelwerte für den Parameter C von 8 (hinterleuchtetes Hinweiszeichen) bzw. 3 (beleuchtetes Hinweiszeichen) benutzt [8.4], [8.5].

Bild 8.1 zeigt den Zusammenhang zwischen Erkennungsweite und optischer Dichte pro Weglänge für unterschiedliche Rauchzusammensetzungen. Dabei wurde in (8.4) und (8.5) für die Proportionalitätskonstante C der jeweilige Mittelwert eingesetzt und der Extinktionskoeffizient K in D_L umgerechnet. Man erkennt, dass augenreizende Rauchbestandteile ab einer Rauchdichte D_L von etwa $0,1 \text{ m}^{-1}$ zu einer gegenüber nicht-reizenden Rauch verstärkten Reduktion der Erkennungsweite führen. Bereits in den sechziger Jahren wurde von Rasbash auf der Basis eigener und fremder Untersuchungen eine ähnliche Korrelation zwischen Erkennungsweite und optischer Dichte pro Weglänge ermittelt [8.6], die nahe bei der von Jin für lichtreflektierende Zeichen ermittelten Beziehung liegt.

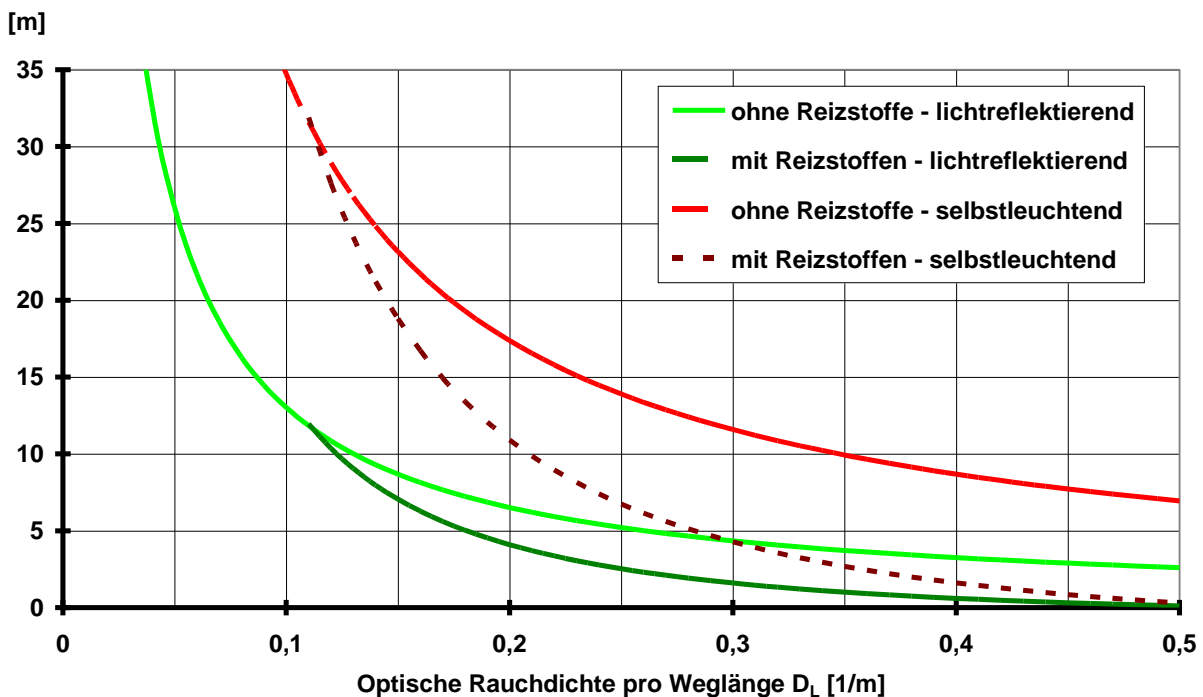


Bild 8.1 Erkennungsweite S als Funktion von D_L

Die Ausgleichskurven lassen sich auch hin zu niedrigeren [8.4] Erkennungsweiten – bis auf etwa 0,5 m (Armeslänge) – extrapolieren. Im Bereich von Rauchdichten D_L kleiner als $0,2 \text{ m}^{-1}$ wird die Erkennungsweite aufgrund der Vereinfachungen und Näherung in (8.4) bzw. (8.5) jedoch systematisch überschätzt. Für den rauchfreien Fall $K = 0$ sind diese Beziehungen nicht anwendbar. Da jedoch für einen Nachweis der Personensicherheit in der Selbstrettungsphase gerade der Übergang von der rauchfreien zur raucharmen (entsprechend der Definition in Abschnitt 8.5) Situation wesentlich ist, sollte in diesen Fällen zwecks genauerer Analyse auf An-

8 Personensicherheit in Rettungswegen

sätze zurück gegriffen werden, die auch für den raucharmen Fall gültig sind. Solche detaillierten Angaben zur Berechnung von Erkennungsweiten für Rettungszeichen auf der Basis entsprechender Rauchversuche findet man in [8.23], [8.24], [8.25]. Allgemein erhält man die Erkennungsweite S , in dem man den Leuchtdichtekontrast c_v mit einem Schwellenkontrast c_{Schwelle} gleichsetzt,

$$c_v = c_{v,0} \cdot F_{\text{Streu}} \cdot e^{-KS} = c_{\text{Schwelle}} \quad (8.6)$$

c_v hängt vom Leuchtdichtekontrast (Verhältnis der Leuchtdichten des Textes bzw. Piktogramms und des Zeichenhintergrunds) an der Zeichenoberfläche $c_{v,0}$, der Streuung an den Rauchpartikeln und der exponentiellen Lichtabschwächung im Rauch ab. Der Schwellenkontrast ist keine Konstante, sondern wird von einer ganzen Reihe von Faktoren beeinflusst. In den allgemeinen Ansatz (8.6) gehen somit nun neben der Rauchdichte auch Beleuchtungsstärke, Beschaffenheit (Größe, Leuchtdichtekontrast) des Zeichens, Streueigenschaften des Rauches (heller oder dunkler Rauch) sowie Kriterien zur Definition der Erkennungsweite (Wahrnehmung oder sichere Identifikation) ein.

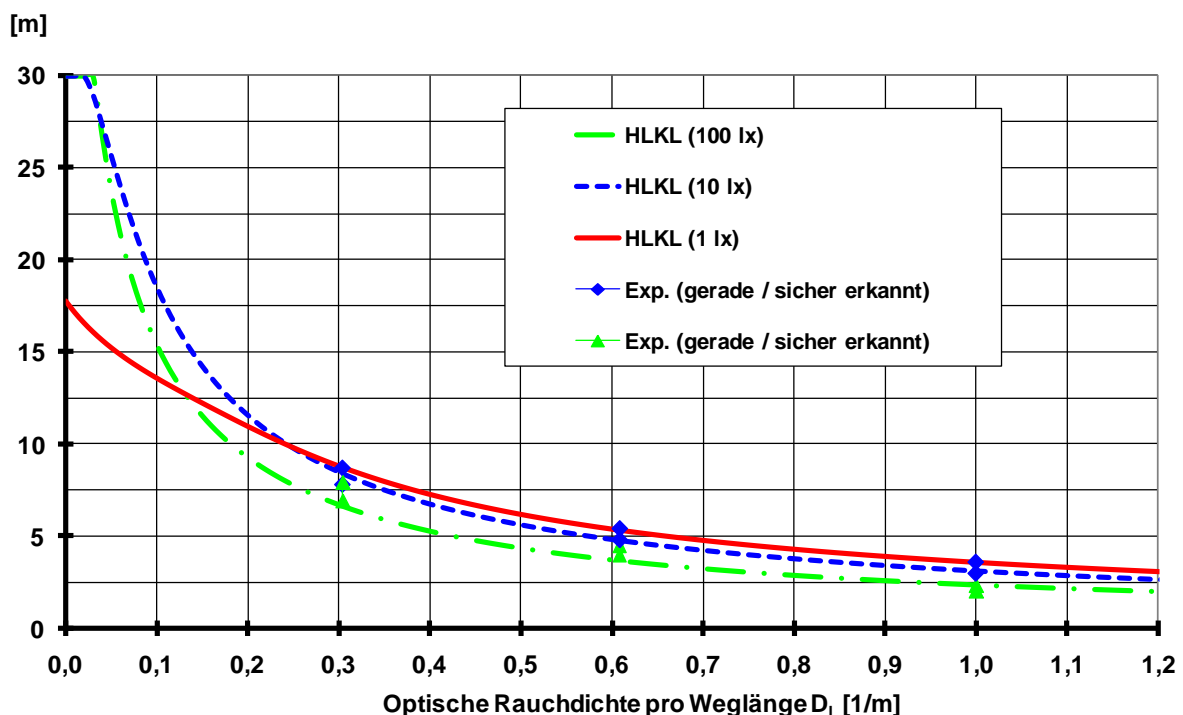


Bild 8.2 Erkennungsweite S eines hinterleuchteten Fluchtweg-Zeichens als Funktion von D_L für unterschiedliche Beleuchtungsstärken [8.25]

Bild 8.2 zeigt exemplarisch den Einfluss der Beleuchtungsstärke für ein hinterleuchtetes Zeichen der Größe 10 cm x 20 cm, mit einer mittleren Leuchtdichte des Piktogramms (weißer Pfeil) von 450 cd/m^2 und des (grünen) Zeichenhintergrunds von 137 cd/m^2 für Rauch mit einem Streuanteil von 80 % ("weißer" Rauch). Die zugehörigen experimentellen Daten stammen aus der Studie [8.23]. Die Erkennungsweitenberechnung nach (8.6) erfordert in der Regel ein iteratives Lösungsverfahren. Weitere Angaben zu dieser Methode findet man in [8.25], den kompletten Satz der notwendigen Bestimmungsgleichungen in [8.30].

Weiterhin ist für die Bestimmung der Erkennungsweite auch der Blickwinkel zwischen Beobachter und Zeichen von Bedeutung. Die hier vorgestellten Methoden zur Erkennungsweitenberechnung beziehen sich auf den optimalen Fall der direkten frontalen Blickrichtung. In der Realität wird man jedoch gerade in komplexen und großräumigen Anlagen sich einem Zeichen in sehr unterschiedlichen Winkeln annähern können, was durch geeignete Ansätze berücksichtigt werden kann [8.25].

Die Gleichungen (8.4) - (8.6) gelten für homogene Zustände über die Distanz des Lichtstrahls. Treten relevante räumliche Unterschiede in der Rauchdichte auf, muss gegebenenfalls rechnerisch eine angemessene lokale Behandlung der Lichtabschwächung (integrale Zerlegung) durchgeführt werden [8.29].

Zwei für die Selbstrettung wichtige Auswirkungen einer durch Rauchbildung reduzierten Erkennungsweite sind die damit verbundene Verlangsamung flüchtender Personen sowie Schwierigkeiten bei der Orientierung bzw. generell das Zurückschrecken vor verrauchten Bereichen [8.10]. Ab einer Rauchdichte D_L von ca. $0,1 \text{ m}^{-1}$ ist in empirischen Studien [8.1] eine Verlangsamung ortsunkundiger Personen zu bemerken. Diese Aspekte lassen sich in fortschrittlichen Simulationsmodellen berücksichtigen, welche individuelle Bewegungs- und Verhaltensaspekte berücksichtigen [8.7], [8.8].

8.4 Die toxische Wirkung von Brandgasen

Eine unmittelbare Beeinträchtigung der individuellen Handlungsfähigkeit ist häufig auf die narkotisierende bzw. erstickende Wirkung der bei einem Brand entstehenden Gase, unter Umständen auch auf Sauerstoffmangel (Hypoxie) zurückzuführen. Die toxische Wirkung besteht in einer Unterversorgung des Gewebes, insbesondere der Gehirnzellen, mit Sauerstoff, was innerhalb kürzester Zeit zur Bewusstlosigkeit und in der Folge auch zum Tode (durch toxische Reaktion oder Hitzeeinwirkung) führen kann. Die häufigsten bei Brandopfern festgestellten erstickend wirkenden Gase sind Kohlenmonoxid (CO) und Cyanwasserstoff (HCN), gegebenenfalls in ihrer Wirkung verstärkt durch Kohlendioxid (CO₂) [8.10], [8.11].

Ein für quantitative Sicherheitsbetrachtungen geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Expositionsdauer bis zum Eintreten von Handlungsunfähigkeit ist die „Fractional Effective Dose“ (FED) - Methode [8.4], [8.10], [8.12]. Dabei wird der Quotient F aus der in einem Zeitintervall Δt aufgenommenen Teildosis und der zur Handlungsunfähigkeit führenden Gesamtdosis für eine Folge von Zeitintervallen aufsummiert. Handlungsunfähigkeit liegt vor, sobald diese Summe den Wert Eins erreicht hat. Die Zeit bis zum Eintreten der Handlungsunfähigkeit ergibt sich dann aus der Summe dieser Zeitintervalle. F hängt von den entsprechenden Quotienten F_j der einzelnen Komponenten CO, HCN, CO₂ sowie O₂ (Sauerstoffmangel) ab:

$$F_{\text{CO}} = \frac{3,317 \cdot 10^{-5} \cdot \text{RMV} \cdot c_{\text{CO}}^{1,036} \cdot \Delta t}{D} \quad (8.7)$$

$$F_{\text{HCN}} = \frac{c_{\text{HCN}}^{2,36} \cdot \text{RMV} \cdot \Delta t}{2,43 \cdot 10^7} \quad (8.8)$$

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta t}{\exp(6,1623 - 0,5189 \cdot c_{\text{CO}_2})} \quad (8.9)$$

$$F_{O_2} = \frac{\Delta t}{\exp(8,13 - 0,54 \cdot (20,9 - c_{O_2}))} \quad (8.10)$$

Die Konzentrationen c_{CO} und c_{HCN} sind in den Einheiten ppm, die Konzentrationen c_{CO_2} und c_{O_2} in den Einheiten Volumenprozent anzugeben. RMV ist die Atemrate in l/min. D bezeichnet die kritische Menge Carboxyhämoglobin (COHb) im Blut, ausgedrückt in Volumenprozent, die zur Bewusstlosigkeit führt. RMV und D sind abhängig von den individuellen körperlichen Merkmalen und dem Aktivitätsgrad. Typische Werte, bezogen auf einen 70 kg schweren Erwachsenen unter leichter körperlicher Beanspruchung sind $D = 30 \%$ und $RMV = 25$ l/min. Für einen Erwachsenen in Ruhe erhält man $D = 40 \%$ und $RMV = 8,5$ l/min. Tod tritt bei $D \approx 50 \%$ ein. Für kleinere Kinder ergeben sich Zeiten bis zum Eintreten der Bewegungsunfähigkeit, die etwa um einen Faktor 2 kürzer sind als diejenigen für Erwachsene.

Es ist zu beachten, dass diese Relationen für kurzzeitige starke Belastungen (Dauer bis zu maximal etwa einer Stunde und CO-Konzentrationen ab etwa 2000 ppm) entwickelt wurden. Bei niedrigeren Konzentrationen flüchtiger Substanzen spielen Sättigungseffekte sowie der Anteil der wieder ausgeatmeten Schadstoffe eine immer größere Rolle, was zu einer Reduktion der wirksamen Dosis führt. Genauere Verfahren zur Ermittlung der Wirkung von Kohlenmonoxid auch bei geringeren Konzentrationen und längeren Einwirkungszeiten sind in [8.10] beschrieben.

Die Gleichungen (8.7) - (8.10) folgen der Darstellung in [8.10]. In ISO 13571 [8.4] findet man leicht vereinfachte Formulierungen dieser Beziehungen, die sich auf einen typischen Erwachsenen bei leichter körperlicher Beanspruchung beziehen.

Die F_j der Relationen (8.7) bis (8.10) müssen nun noch durch einen Ansatz miteinander verknüpft werden, der die Wechselwirkung der einzelnen Komponenten in geeigneter Näherung berücksichtigt, insbesondere die Auswirkung der durch die Gegenwart von CO_2 verursachten erhöhten Atmungsrate (Hyperventilation). Diese steigert die Aufnahme der deutlich stärker toxisch wirksamen Gase CO oder HCN, sofern diese vorhanden sind. Daher wird ein Verstärkungsfaktor V_{Hyp} eingeführt, der es erlaubt, den Effekt der Hyperventilation abzuschätzen. Damit ergibt sich folgender Ansatz zur Berechnung des Quotienten F:

$$F = \max((F_{CO} + F_{HCN}) \cdot V_{Hyp} + F_{O_2}, F_{CO_2}) \quad (8.11)$$

mit

$$V_{Hyp} = \exp(0,2 \cdot c_{CO_2}). \quad (8.12)$$

In [8.4] wird die Anwendung von (8.11) auf CO und HCN beschränkt, da davon ausgegangen wird, dass dies die dominanten Wirksubstanzen im Brandrauch sind. Es wird in einer Anmerkung jedoch darauf hingewiesen, dass Sauerstoffmangel ab einer O_2 -Konzentration unterhalb von 13 % zu berücksichtigen sei. Hyperventilation gemäß (8.12) ist laut [8.4] ab einer CO_2 -Konzentration von 2 Volumenprozent in die Berechnung mit einzubeziehen.

Toxische Auswirkungen, hier insbesondere die des Sauerstoffmangels und des Kohlendioxids, sind oft nicht nur dosis-, sondern auch konzentrationsabhängig [8.10]. Für die Festlegung von

Akzeptanzwerten sind außerdem u. U. auch Langzeitwirkungen zu berücksichtigen [8.13]. Benutzt man in (8.11) Bezugsgrößen für einen typischen Erwachsenen bei leichter körperlicher Beanspruchung, sollte für die Bestimmung der verfügbaren Räumungszeit ein maximales F von 0,1 bis 0,3 zugrunde gelegt werden, wobei der untere Wert für besonders sensible Personengruppen gilt [8.4], [8.10], [8.20], [8.26].

Hinsichtlich ihrer Wirkung meist schwieriger einzuschätzen ist die Vielzahl von Reizgasen, die bei einem Brand freigesetzt werden können. Diese beeinträchtigen häufig den sensorischen Bereich und können daher die Erkennungsweite (siehe Bild 8.1 und Relation (8.5)) reduzieren und die Orientierung erschweren. Methoden zur Abschätzung der Auswirkungen von Reizgasen auf Personen (Handlungsfähigkeit, Behinderung der Flucht) und zugehörige Konzentrationsgrenzwerte findet man in [8.4], [8.10], [8.14].

Um die Kombinationswirkung unterschiedlicher Reizstoffe zu berücksichtigen, wurde das Konzept der Fractional Irritant Concentration FIC [8.10] (bzw. Fractional Effective Concentration FEC in der Bezeichnung von ISO 13571 [8.4]) entwickelt. Ähnlich dem FED-Modell werden dabei die Quotienten aus der aktuellen Konzentration und einem kritischem Referenzwert für den betreffenden Reizstoff gebildet. Je nach gewähltem Referenzwert entspricht der Gesamtwert $FIC_{irr} = 1$ entweder einer Reizwirkung, welche die Fluchtmöglichkeiten deutlich einschränkt oder dem Eintreten von Handlungsunfähigkeit (siehe Tabelle 8.1). Im Unterschied zum FED-Modell spielt in diesem Modellansatz die Expositionsdauer keine Rolle, sondern es wird für jeden Zeitpunkt der augenblickliche effektive Konzentrationswert ermittelt. Unter der Annahme, dass die Wirkung der Reizgase näherungsweise additiv ist, ergibt sich der Gesamtwert FIC_{irr} als Summe der FIC der Einzelkomponenten. Referenzwerte für häufig in Brandgasen auftretende Reizstoffe sind in Tabelle 8.1 aufgeführt. Die Werte von Purser beziehen sich auf Konzentrationen, die bei 50 % der betroffenen Personen Behinderungen bei der Flucht bzw. Handlungsunfähigkeit hervorrufen. Die Definition von Handlungsunfähigkeit in ISO 13571 bezieht sich auf eine Person durchschnittlicher Empfindlichkeit. Es fällt auf, dass insbesondere bei Fluorwasserstoff HF und Formaldehyd deutliche Unterschiede zwischen [8.10] und [8.4] zu verzeichnen sind, obwohl die jeweilige Definition des Begriffs der Handlungsunfähigkeit ähnlich ist. Bei einzelnen Stoffen (insbesondere HCl) sind auch deutliche Unterschiede zu den in Anhang 5 der vfdb-Richtlinie 10/03 aufgeführten Auswirkungen von Schadstoffen bei Bränden [8.14] festzustellen. Für besonders sensible Bevölkerungsgruppen wird in [8.10] ein Sicherheitsfaktor von 0,3 für die Festlegung der Referenzwerte gemäß Tabelle 8.1 vorgeschlagen.

Tabelle 8.1 Referenzwerte zur Bestimmung von FIC-Werten

Reizgas	Handlungsunfähigkeit [8.4]	Handlungsunfähigkeit [8.10]	Behinderung der Flucht [8.10]
HCl	1000 ppm	900 ppm	200 ppm
HBr	1000 ppm	900 ppm	200 ppm
HF	500 ppm	900 ppm	200 ppm
SO ₂	150 ppm	120 ppm	24 ppm
NO ₂	250 ppm	350 ppm	70 ppm
Akrolein	30 ppm	20 ppm	4 ppm
Formaldehyd	250 ppm	30 ppm	6 ppm

Da die für Brandsimulationsrechnungen notwendigen Produktionsraten für die Freisetzung von Reizgasen oft nicht bekannt sind, ist eine rechnerische Bewertung der Reizgaswirkung mit Hilfe von Ingenieurmethoden zurzeit nur eingeschränkt möglich. Man kann bei Mischbrandlasten davon ausgehen, dass bei einer optischen Dichte pro Weglänge zwischen $0,1 \text{ m}^{-1}$ und $0,2 \text{ m}^{-1}$ reizend wirkende Gasanteile im Brandrauch vorhanden sind, die jedoch für kurze Wegstrecken zumutbar sind. Bei einer Rauchdichte von $0,1 \text{ m}^{-1}$ und darunter kann im Rahmen eines ingenieurtechnischen Nachweises in der Regel davon ausgegangen werden, dass die Rauchgasbestandteile (insbesondere auch die Reizgase) für eine erfolgreiche Selbstrettung unbedenklich sind (siehe Bild 8.3 und [8.7], [8.9], [8.10], [8.19], [8.20], [8.33]).

Für die Beurteilung der Wirkung toxischer Substanzen, die nicht explizit in den bisher aufgeführten Verfahren und den zugehörigen Literaturreferenzen behandelt werden, kann man andere bewährte Methoden der Konsequenzanalyse, wie sie z. B. in [8.21] beschrieben werden, einsetzen. Außerdem gibt es alternative Festlegungen von Beurteilungswerten für die Personensicherheit in Gefahrensituation, wie z. B. die Emergency Response Planning Guidelines der American Industrial Hygiene Association (dabei insbesondere die Kategorie ERPG-2, die Grenzwerte beschreibt, unterhalb deren bei einer bis zu einstündigen Expositionsdauer keine ernsten oder irreversiblen Gesundheitsstörungen zu erwarten sind und die Fähigkeit zur erfolgreichen Selbstrettung nicht beeinträchtigt wird) oder die international unter Führung der USA (in Deutschland bearbeitet durch die Kommission für Anlagensicherheit) erarbeiteten AEGL-Werte (Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals – aktuelle Werte abrufbar auf der offiziellen Homepage der United States Environmental Protection Agency EPA). Auf die AEGL-Werte bezieht sich auch die vfdb-Richtlinie 10/01 zur Bewertung von Schadstoffkonzentrationen im Feuerwehreinsatz, in welcher die für eine bis zu 4-stündige Expositionsdauer konzipierten Einsatztoleranzwerte ETW festgelegt sind. Das zugehörige Grundlagenpapier [8.22] bietet einen umfassenden Überblick über Methoden zur Abschätzung gesundheitlicher Folgen von Großbränden. Ausbeuten der wichtigsten akut toxischen Brandgase

in Abhängigkeit der Brandlasten und Ventilationsbedingungen werden in [8.28] zusammengestellt.

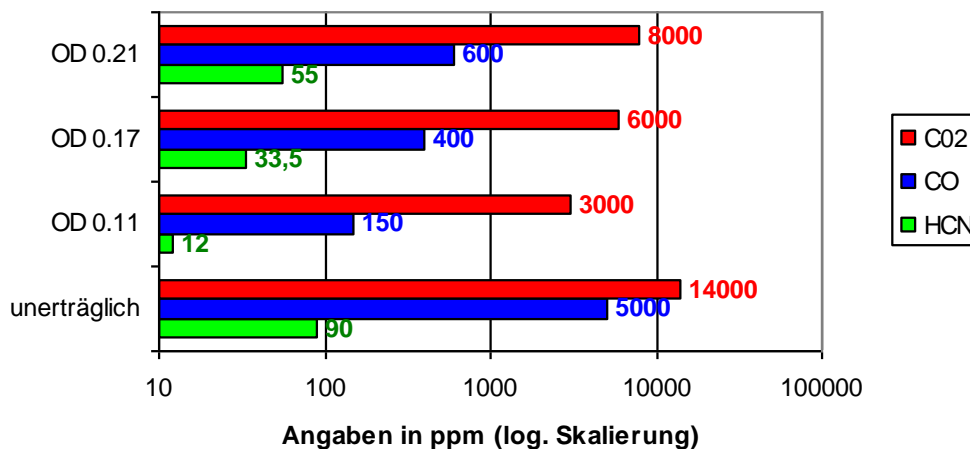


Bild 8.3 Gemessene Verteilungen toxisch wirksamer Gasanteile im Brandrauch [8.9]

8.5 Die thermische Wirkung von Rauchgasen

Neben den toxischen Effekten der Rauchgase beeinflusst auch eine mögliche Wärmeeinwirkung entscheidend die individuelle Belastung und damit die für die Selbstrettung verfügbare Zeitspanne. Es gibt vor allem drei grundlegende Mechanismen der thermischen Einwirkung, die zur Handlungsunfähigkeit und – in letzter Konsequenz – zu schweren körperlichen Schäden bis hin zum Tode führen können: thermischer Schock, Hautverbrennungen und Verbrennungen des Atmungsapparats. Übersichtsartikel dazu findet man z. B. in [8.4], [8.10], [8.15], [8.16].

Schädigungen durch Heißgase können sich einstellen, wenn Personen längere Zeit einer erhöhten Umgebungstemperatur ausgesetzt sind, die jedoch noch nicht zu direkten Verbrennungen führt. Entsprechende kritische Temperaturen hängen von der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer ab und reichen von 120 °C bei trockener Luft bis hin zu etwa 80 °C. Ursache für den thermischen Schock ist ein Anstieg der Körperwärme, wobei Werte über 40 °C Körpertemperatur zu Bewusstseinsbeeinträchtigungen und körperlichen Schäden, Körpertemperaturen über 42,5 °C unbehandelt innerhalb weniger Minuten sogar zum Tode führen können.

Hautverbrennungen hängen von dem die Hautoberfläche erreichenden Wärmestrom ab und sind weitgehend unabhängig vom Mechanismus der Wärmeübertragung. Für den Fall der Selbstrettung besonders wichtig sind Konvektion und Wärmestrahlung. Neben der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer spielen hier die Luftströmung sowie die Art der Bekleidung eine wesentliche Rolle. Während im Bereich der Grenztemperatur zwischen Hitzeschock und Verbrennungen die Toleranzzeit bei 15 - 25 Minuten liegt, sinkt diese bei Temperaturen von ca. 200 °C (trockene Luft) auf 3 - 4 Minuten. Bei Wärmestrahlung liegt die Erträglichkeitsschwelle bei etwa 2,5 kW/m². Neben dem unmittelbar durch die Verbrennungen hervorgerufenen Schmerz können Verbrennungen der Hautoberfläche auch zu einem Schockzustand führen, der durch den Verlust an Körperflüssigkeit verursacht wird. Es kommt so zu einem Kreislaufversagen bis hin zum Kollaps oder Bewusstlosigkeit.

8 Personensicherheit in Rettungswegen

Bei Verbrennungen des Atemtrakts spielt die Luftfeuchtigkeit eine noch größere Rolle als bei den anderen Einwirkungsarten. Grundsätzlich gilt, dass die zuvor angegebenen Erträglichkeitsgrenzen für Hautverbrennungen (kritische Lufttemperatur bzw. kritischer Wärmestrom) auch für den Schutz vor Verbrennungen des Atemtrakts ausreichen. Bei Temperaturen oberhalb von 180 °C kann es zu einem plötzlich einsetzenden Inhalationshitzeschock kommen.

Somit lässt sich auf empirischer Basis die Zeit τ bis zum Eintreten der individuellen Handlungsunfähigkeit in Abhängigkeit von der lokalen Umgebungstemperatur abschätzen. Dabei ist zu beachten, welche Definition dem Begriff der Handlungsunfähigkeit im Zusammenhang mit Hitzeinwirkung zu Grunde liegt. Purser [8.10] benutzt die folgende, vom betreffenden Temperaturbereich abhängige Definition zur Feststellung der Handlungsunfähigkeit: (1) Zeitpunkt, an welchem schmerzhaft Hautreizungen eintreten, unmittelbar vor der Schwelle zur Verbrennung oder (2) der Zeitpunkt, an welchem ein Hitzeschock zur Bewusstseinstrübung führt. Auf dieser Basis wurden die folgenden Relationen zur Bestimmung der Zeit τ für das Erreichen von Handlungsunfähigkeit durch konvektiven Wärmeübertrag bei mittlerer Luftfeuchte bestimmt. Es gilt

$$\tau_{conv} [\text{min}] = \frac{2 \cdot 10^{31}}{(T[\text{°C}])^{16,963}} + \frac{4 \cdot 10^8}{(T[\text{°C}])^{3,7561}} \quad (8.13)$$

Bei einer hohen Luftfeuchtigkeit (im Bereich von 100 %) ist zu prüfen, ob nicht bereits bei niedrigeren Temperaturen Bedingungen für das Eintreten eines thermischen Schocks vorliegen können.

Insbesondere für die nähere Umgebung von großen Flammen und unterhalb von Heißgas-schichten lassen sich auch kritische Bestrahlungsstärken q angeben. Unterhalb eines Schwellenwertes von 2,5 kW/m² ist die Wärmestrahlung für wenigstens einige Minuten tolerabel, darüber erreicht man jedoch sehr schnell den Bereich, der nur für wenige Sekunden erträglich ist, wie die in Tabelle 8.2 angegebenen Erträglichkeitsgrenzen verdeutlichen. Der Grenzwert der Bestrahlungsstärke für Langzeitwirkung liegt laut [8.17] bei 1,7 kW/m².

Für Bestrahlungsstärken $q > 2,5 \text{ kW/m}^2$ lässt sich die Zeit bis zum Erreichen von Verbrennungen zweiten Grades durch die Beziehung

$$\tau_{rad} [\text{min}] = \frac{6,9}{(q[\text{kW/m}^2])^{1,56}} \quad (8.14)$$

abschätzen. Die Zeit bis zum Erreichen der Schmerzgrenze, welche nicht notwendiger Weise die Flucht beeinträchtigen muss, lässt sich mit Hilfe von

$$\tau_{rad} [\text{min}] = \frac{4,2}{(q[\text{kW/m}^2])^{1,9}} \quad (8.15)$$

ermitteln [8.4].

Purser [8.10] gibt

$$\tau_{\text{rad}} [\text{min}] = \frac{1,33}{(q[\text{kW}/\text{m}^2])^{1,33}} \quad (8.16)$$

für das Erreichen der Schmerzgrenze an.

Tabelle 8.2 Grenzen der Erträglichkeit von Wärmestrahlung und Konvektion [8.18]

Einwirkung	Intensität bzw. Temperatur	erträgliche Einwirkzeit
Wärmestrahlung	10 kW/m ²	Schmerz nach 4 s
(Einwirkung auf Haut)	4 kW/m ²	Schmerz nach 10 - 20 s
	2,5 kW/m ²	Schmerz nach 30 s
Konvektion	< 40 °C (bei H ₂ O-Sättigung)	> 30 min
(Atemwege, Haut)	160 °C (< 10 % H ₂ O)	2 min
	120 °C (< 10 % H ₂ O)	7 min
	100 °C (< 10 % H ₂ O)	12 min

Für die kombinierte Wirkung von Wärmestrahlung und Konvektion lässt sich ebenfalls ein von der Expositionsdauer abhängiges Modell angeben [8.4], [8.10]

$$\text{FED}_{\text{thermisch}} = \sum \left(\frac{\Delta t}{\tau_{\text{conv}}} + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{rad}}} \right) \quad (8.17)$$

Bei $\text{FED}_{\text{thermisch}} = 1$ ist die Grenze der Handlungsfähigkeit erreicht.

8.6 Anhaltswerte zur Beurteilung der Personensicherheit

An Stelle der in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen aufwendigen Bestimmungsgleichungen der toxischen oder thermischen Dosismodelle sollen Anhaltswerte angegeben werden, mit deren Hilfe eine mögliche Gefährdung durch die verschiedenen Brandkenngrößen beurteilt werden kann. Diese Anhaltswerte zum quantitativen Nachweis der Schutzziele sind in Tabelle 8.3 zusammengestellt. Dabei wurden typische Mischbrandlasten, wie sie im Bereich Wohnung, Büro oder Verkaufsstätten anzutreffen sind, vorausgesetzt.

Das Verhältnis der Konzentrationen CO : HCN liegt typischerweise bei Brandlasten mit geringem Stickstoffanteil (< 2 % der Brennstoffmasse - z. B. Bürobrände) bei CO : HCN > 50 : 1, so dass die Hauptbelastung von CO ausgeht. Bei Bränden mit signifikantem Stickstoffanteil (> 2 % der Brennstoffmasse) liegt das Verhältnis bei 12,5 : 1 [8.26], [8.33]. Diese relativ hohe HCN-Ausbeute wurde für die Anhaltswerte in Tabelle 8.3 zu Grunde gelegt.

Es ist weiterhin zu beachten, dass bei einem Brand die lokalen Schadstoff- und Sauerstoffkonzentrationen in einem thermodynamischen Zusammenhang stehen. Da aus diesem Grund die Sauerstoffkonzentration – bei Einhaltung der in Tabelle 8.3 angegebenen Schadstoff-

Grenzwerte – deutlich über 15 Vol.-% liegt (ein Wert, der für sich alleine genommen bei den hier in Frage kommenden Expositionszeiten zu keinen gravierenden Schäden führt), wird die Sauerstoffkonzentration nicht explizit als Beurteilungskriterium aufgeführt.

Im Laufe der Rauchausbreitung durch ein Schadenfeuer kommt es zu einer Einmischung heißen Brandrauchs in die Kaltgaszone. Die Folge ist eine Temperaturerhöhung in der Kaltgas-schicht sowie eine Anreicherung mit Rauchpartikeln und Schadgasanteilen. Überschreitet diese Anreicherung nicht die in Tabelle 8.3 angegebenen Anhaltswerte, bleibt auch die zugehörige Erhöhung der Gastemperatur entsprechend niedrig. In [8.24] wurde auf der Grundlage von Messungen bei Brandversuchen und einer Parameterstudie mit Brandsimulationsmodellen eine maximale Temperaturerhöhung in der Größenordnung von 10 K ermittelt. Dieser Wert liegt deutlich unter den in Tabelle 8.3 angegebenen Akzeptanzwerten für die Gasphase, so dass bei einem Nachweis akzeptabler Rauchdichten in der Regel auch das Temperaturkriterium erfüllt ist.

Die Unterteilung der Tabelle 8.3 in eine kurze (bis ca. 5 Minuten), mittlere (ca. 5 - 15 Minuten) und längere (ca. 15 - 30 Minuten) Aufenthaltsdauer, in dem durch die Brandwirkung betroffenen Bereich, beschreibt typische Kategorien von Räumungszeiten. Das Schutzziel ist erfüllt, wenn keiner der aufgeführten Anhaltswerte während der zugehörigen Aufenthaltsdauer überschritten wird.

In den folgenden Fällen sind gegebenenfalls detaillierte Analysen mit den in Kapitel 8 genannten Methoden erforderlich, bei denen die individuelle dosisabhängige Wirkung berücksichtigt werden kann:

- die Brandrauchzusammensetzung weicht deutlich von den in Tabelle 8.3 vorausgesetzten relativen Schadstoffkonzentrationen ab oder es werden andere toxische Verbrennungsprodukte als CO, CO₂ und HCN in einer für die Personensicherheit relevanten Menge freigesetzt,
- die Expositionszeiten weichen deutlich von den drei gewählten Kategorien der Aufenthaltsdauer ab (sehr kurze oder sehr lange Expositionszeiten) oder die Konzentrationsverläufe unterliegen starken zeitlichen Schwankungen,
- es sind besonders sensible Personengruppen betroffen (z. B. in Krankenhäusern oder in Pflegeeinrichtungen),
- es soll die Belastung von Personen bewertet werden, die sich (zumindest für eine bestimmte Zeitdauer) nicht aus der Gefahrenzone entfernen können (z. B. Fahrgäste in fahrenden Schienenfahrzeugen) oder die auf Fremdrettung angewiesen sind.

Tabelle 8.3 Beurteilungsgrößen und Anhaltswerte für quantitative Schutzziele

Beurteilungsgröße	längere Aufenthaltsdauer (< 30 min)	mittlere Aufenthaltsdauer (ca. 15 min)	kurze Aufenthaltsdauer (< 5 min)
CO-Konzentration	100 ppm	200 ppm	500 ppm
CO ₂ -Konzentration	1 Vol.-%	2 Vol.-%	3 Vol.-%
HCN-Konzentration ⁽¹⁾	8 ppm	16 ppm	40 ppm
Wärmestrahlung	1,7 kW/m ²	2,0 kW/m ²	< 2,5 kW/m ²
Gastemperatur ⁽²⁾	45 °C	50 °C	50 °C
Rauchdichte D _L ⁽³⁾	0,1 m ⁻¹	0,1 m ⁻¹ / 0,15 m ⁻¹ ⁽⁴⁾	0,1 m ⁻¹ / 0,2 m ⁻¹ ⁽⁴⁾
Erkennungsweite ^{(5), (6)}	10 m – 20 m	10 m – 20 m	10 m – 20 m

⁽¹⁾ Die HCN-Konzentrationen sind starken Streuungen unterworfen. Für typische Brände besteht eine Korrelation mit den CO-/CO₂-Konzentrationen, wobei hier konservativ ein Verhältnis CO:HCN von 12,5:1 vorausgesetzt wird.

⁽²⁾ Die Gastemperatur bezieht sich auf Luft mit einem Gehalt an Wasserdampf von weniger als 10 Volumenprozent. Die Gastemperatur darf nicht isoliert, ohne gleichzeitige Bewertung der Rauchausbreitung (insbesondere der Rauchdichte) als Beurteilungsgröße für die Personensicherheit herangezogen werden.

⁽³⁾ Unter Zugrundelegung eines massenspezifischen Extinktionskoeffizienten $K_m = 8.7 \text{ m}^2/\text{g}$ ergibt sich (gerundet) für $D_L = 0,1 \text{ m}^{-1}$ eine Rußkonzentration von $25 \text{ mg}/\text{m}^3$ bzw. für $D_L = 0,2 \text{ m}^{-1}$ von $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ (siehe Abschnitt 8.2).

⁽⁴⁾ Der jeweils höhere Anhaltswert kann zur Beurteilung angesetzt werden, wenn der betreffende Bereich übersichtlich strukturiert ist oder die Personen mit den Räumlichkeiten vertraut sind.

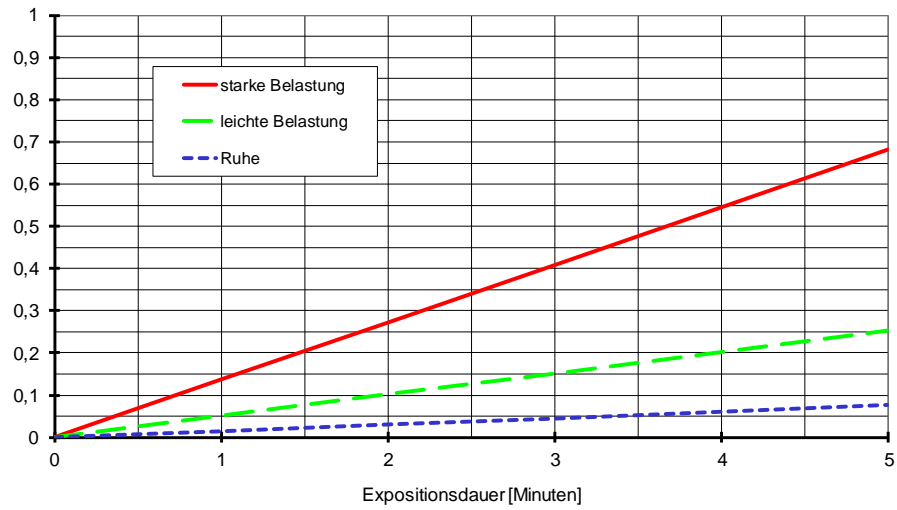
⁽⁵⁾ Die Erkennungsweite ist starken Streuungen unterworfen. Für typische Brände besteht eine Korrelation mit der Rauchdichte D_L . Näheres dazu siehe Abschnitt 8.3.

⁽⁶⁾ Das Kriterium Erkennungsweite wird in der Regel durch den Nachweis der Rauchdichte D_L i. V. m. der Erkennung von Sicherheitszeichen nachgewiesen (siehe Abschnitt 8.3). Es wird daher vorausgesetzt, dass auf Ausgänge hinweisende Sicherheitszeichen (beleuchtet oder hinterleuchtet) innerhalb der raucharmen Schicht angebracht werden.

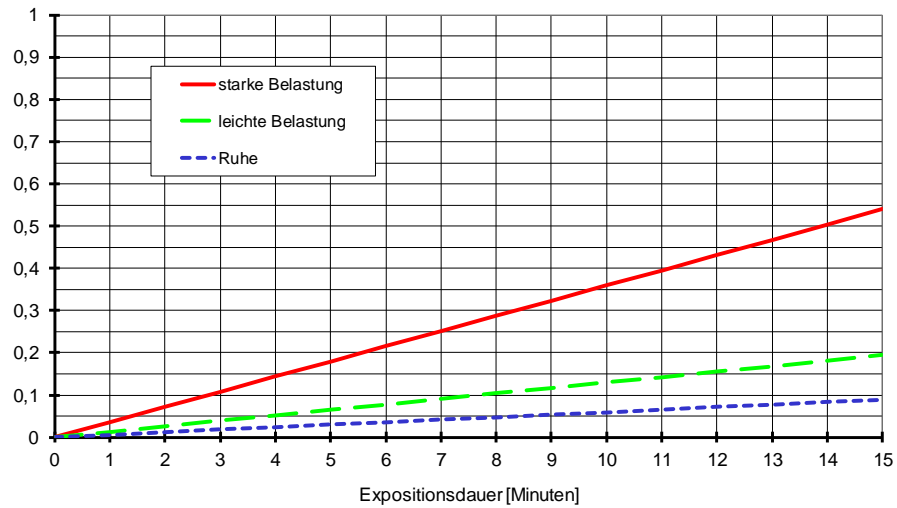
Bei einer optischen Dichte pro Weglänge $D_L \leq 0,1 \text{ m}^{-1}$ kann im Rahmen eines ingenieurtechnischen Nachweises in der Regel davon ausgegangen werden, dass gleichzeitig die Akzeptanzwerte für toxische Verbrennungsprodukte im Rauchgas nicht überschritten werden und auch andere Rauchgasbestandteile (insbesondere Reizgase, welche die Erkennungsweite beeinflussen) sowie die Rauchgastemperatur unbedenklich sind [8.7], [8.9], [8.19], [8.20], [8.33]. Dies kann somit als Kriterium für den Nachweis einer raucharmen Schicht in den Rettungswegen betrachtet werden.

8 Personensicherheit in Rettungswegen

FED-Modell (500 ppm CO, 40 ppm HCN, 3 % CO₂, 18 % O₂)



FED-Modell (200 ppm CO, 16 ppm HCN, 2% CO₂, 19 % O₂)



FED-Modell (100 ppm CO, 8 ppm HCN, 1% CO₂, 20 % O₂)

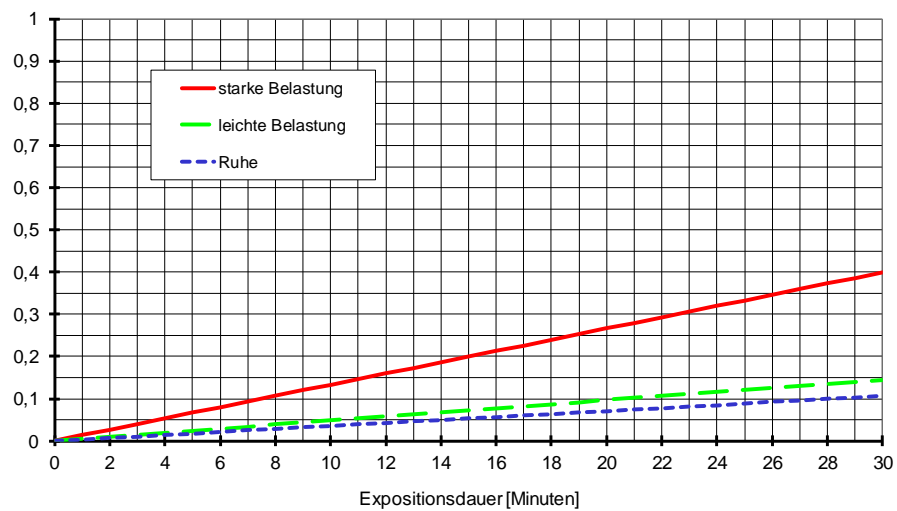


Bild 8.4 FED-Quotienten für die Anhaltswerte aus Tabelle 8.3

Bild 8.4 zeigt den Verlauf des auf 1 normierten FED-Quotienten (siehe Relation (8.11)) für die Anhaltswerte aus Tabelle 8.3, bezogen auf die Belastungsgrade starke Belastung bzw. besonders empfindliche Personen ($D = 20\%$, $RMV = 50$ l/min), leichte Belastung ($D = 30\%$, $RMV = 25$ l/min) und Ruhe ($D = 40\%$, $RMV = 8,5$ l/min). Die Anhaltswerte aus Tabelle 8.3 erreichen für leichte Belastung bei maximaler Expositionsdauer der jeweils zugrunde liegenden Unterteilung einen Wert von ca. 0,3 und bleiben auch für starke Belastung deutlich unter dem Limit für Handlungsunfähigkeit von 1.

8.6 Rauchausbeuten

Die in Kapitel 4 beschriebenen Bemessungsbrände dienen zur Quantifizierung von Brandszenarien hinsichtlich der Freisetzung von Wärme und Rauch. Hierbei sind neben dem zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates (Brandverlaufskurve) auch die Ausbeuten der wesentlichen Verbrennungsprodukte (sog. Rauchausbeuten) sowie das Rauchpotential D_m bzw. der massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m (siehe Abschnitt 8.2) vorzugeben.

Die Rauchausbeuten Y_i [g/g] geben das Verhältnis zwischen der Masse des freigesetzten Verbrennungsproduktes (gekennzeichnet durch den Index i) und der Masse des verbrannten Brandstoffes an. Für die Durchführung von Brandsimulationsrechnungen zur Bewertung der Personensicherheit sind vor allem die Ausbeuten der narkotisierend wirkenden Schadstoffe Kohlenstoffmonoxid (CO) Y_{CO} , Cyanwasserstoff (HCN) Y_{HCN} und Kohlendioxid (CO₂) Y_{CO_2} sowie die Ausbeute der sich trübenden Rauchpartikel (Ruß) $Y_{Ru\beta}$ von Bedeutung. Alternativ zur Rußausbeute $Y_{Ru\beta}$ [g/g] kann auch das Rauchpotential D_m [m²/g] vorgegeben werden, wobei beide Größen durch Beziehung (8.3) miteinander verknüpft sind. Die Freisetzung von Cyanwasserstoff ist nur bei stickstoffhaltigen Brandlasten, wie beispielsweise Polyurethan, Nylon oder Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), zu berücksichtigen.

Durch Multiplikation der Rauchausbeuten mit der Abbrandrate erfolgt die Bestimmung der Freisetzungsrates des jeweiligen Verbrennungsproduktes. Aus diesem Grund ist es weiterhin erforderlich den effektiven Heizwert $h_{u,eff}$ (Produkt aus Heizwert h_u und Verbrennungseffektivität χ mit $\chi < 1$) des Brandstoffes bzw. der Mischbrandlast vorzugeben, da hierüber die Bestimmung der Abbrandrate in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzungsrates erfolgt:

$$\dot{m}_i = Y_i \cdot \dot{m}_{ab} = Y_i \cdot \frac{\dot{Q}}{h_{u,eff}} \quad (8.18)$$

Da der Nachweis der Personensicherheit in der Regel für die Selbstrettung in einer frühen Brandphase erfolgt, ist es erforderlich die Rauchausbeuten des primären Brandstoffes an der Zündstelle vorzugeben.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Rauchausbeuten:

1) Verwendung empirischer Daten für spezifische Brandstoffe (Literaturwerte)

Zur Quantifizierung eines Brandszenariums hinsichtlich der Freisetzung von Verbrennungsprodukten werden die Rauchausbeuten und Rauchpotentiale der wesentlichen Brandstoffe auf der Grundlage von Literaturwerten (z. B. [8.5], [8.22], [8.27], [8.28]) festgelegt. Ebenfalls ist der effektive Heizwert der wesentlichen Brandstoffe zu bestimmen. Bei Mischbrandlasten erfolgt eine gewichtete Mittelung unter Berücksichtigung der jeweiligen Abbrandrate.

Ausgehend von den Literaturwerten können die Rauchausbeuten und Rauchpotentiale direkt Stoffen bzw. Gegenständen zugeordnet werden. So kann etwa beim Brand in einer Eingangshalle die Zündung an einer Sitzgruppe erfolgen, deren Polsterung aus Polyurethanschaum hergestellt ist. Für diesen Stoff können aus der Literatur die entsprechenden Rauchausbeuten entnommen werden.

Die in der Literatur enthaltenen Rauchausbeuten gelten überwiegend nur für brandlastgesteuerte Brandbedingungen. Bei unterventilierten Brandbedingungen kommt es zur vermehrten Bildung von Produkten der unvollständigen Verbrennung und somit zum Anstieg der CO-Ausbeute und Rußausbeute bzw. zur Verringerung der CO₂-Ausbeute. Dementsprechend sind die Rauchausbeuten und gegebenenfalls auch das Rauchpotential für unterventilierte Brandbedingungen zu korrigieren. Diesbezügliche Rechenverfahren sind in [8.27] oder [8.28] enthalten.

2) Verwendung konservativer Rauchausbeuten

Für konservative Brandszenarien können die Ausbeuten von Verbrennungsprodukten unter Berücksichtigung der Art des maßgeblichen Brennstoffes sowie der vorherrschenden Ventilationsbedingungen abgeschätzt werden. Hinsichtlich der Art des Brennstoffes wird nachfolgend zwischen Zellulose, zwei Kunststoffgruppen und halogenierten Kunststoffen unterschieden. Es ist anzumerken, dass aufgrund der hohen Vielfalt an unterschiedlichen Kunststoffen konservative Rauchausbeuten gewählt wurden. Aus diesem Grund empfiehlt sich soweit möglich die Bestimmung der Rauchausbeuten gemäß Punkt 1. Ebenso sollte auch bei der Berechnung der Rauchdichte D_L möglichst direkt auf empirische Daten für das Rauchpotential D_m bzw. den massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m zurückgegriffen werden, da der zugehörige Messvorgang unmittelbar auf den sich trübenden Eigenschaften des Brandrauchs basiert.

Die nachfolgend aufgeführten Rauchausbeuten stammen aus [8.27]. Hierbei wurden für die Stoffgruppen Zellulose, Kunststoffe A und B sowie halogenierte Kunststoffe folgende Stoffe verwendet.

Zellulose:	Holz bzw. Papier
Kunststoff A:	Polyethylen (PE)
Kunststoff B:	Polystyrol (PS)
Halogenierte Kunststoffe:	Polyvinylchlorid (PVC)

Für Mischbrandlasten können aus den oben aufgeführten Stoffgruppen Mittelwerte gebildet werden.

Tabelle 8.4 enthält die Ausbeuten von Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO) sowie die Ausbeute der Rauchpartikel (Ruß) sowie den effektiven Heizwert für die oben aufgeführten Stoffgruppen. Dabei wird zwischen brandlast- und ventilationsgesteuerten Bedingungen unterschieden.

Brennbare Flüssigkeiten lassen sich je nach Stoffklasse entweder den zellulosehaltigen Brandstoffen (z. B. Alkohole), der Stoffgruppe Kunststoffe A (z. B. Alkane) oder der Stoffgruppe Kunststoffe B (z. B. Aromaten) zuordnen.

Tabelle 8.4 Ausbeuten und effektive Heizwerte für bemessungsrelevante Stoffgruppen

Ventilationsbedingungen	Stoffgruppe	$h_{u,eff}$ [kJ/g] ¹	Y_{CO_2} [g/g]	Y_{CO} [g/g]	$Y_{Ru\beta}$ [g/g]
brandlastgesteuert	Zellulose	12,0	1,30	0,004	0,015
	Kunststoff A	30,5	2,76	0,024	0,060
	Kunststoff B	27,4	2,33	0,060	0,164
	halogenierte Kunststoffe	11,5	0,46	0,063	0,172
ventilationsgesteuert ²	Zellulose	12,0	0,91	0,145	0,028
	Kunststoff A	30,5	1,78	0,459	0,098
	Kunststoff B	27,4	1,50	0,137	0,331
	halogenierte Kunststoffe	11,5	0,32	0,500	0,237

Rauchausbeuten für den narkotisierend wirkenden Rauchbestandteil Cyanwasserstoff (HCN) sind bei Vorhandensein stickstoffhaltiger Brandlasten, wie beispielsweise Polyurethan, Nylon oder Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), zu berücksichtigen. Diese Rauchausbeuten können der Literatur, z. B. [8.22], [8.27], [8.28], entnommen oder anhand folgender Beziehung abgeschätzt werden:

Brandlasten mit < 2 % Stickstoffanteil: $Y_{HCN} / Y_{CO} = 1 / 52$

Brandlasten mit > 2 % Stickstoffanteil: $Y_{HCN} / Y_{CO} = 1 / 13$

Bei Brandlasten mit > 2 % Stickstoffanteil geht der Hauptbeitrag der Toxizität von Cyanwasserstoff aus. Bei Massenanteilen deutlich über 2 % Stickstoff werden teilweise noch höhere HCN-Ausbeuten festgestellt, so dass das Verhältnis $Y_{HCN} / Y_{CO} = 1 / 13$ nicht mehr konservativ ist [8.28].

Mit Hilfe von Beziehung (8.3) und $K_m = 8,7 \text{ m}^2/\text{g}$ (Bezugswert für Mischbrandlasten) ergeben sich aus Tabelle 8.4 Rauchpotentiale D_m zwischen $0,06 \text{ m}^2/\text{g}$ und $0,65 \text{ m}^2/\text{g}$ (brandlastgesteuert) bzw. zwischen $0,11 \text{ m}^2/\text{g}$ und $1,25 \text{ m}^2/\text{g}$ (ventilationsgesteuert). Diese Werte sind überwiegend konsistent mit empirischen Daten [8.5], im Falle von PVC sogar deutlich konservativ.

¹ Zur Ermittlung des effektiven Heizwertes wurde eine Verbrennungseffektivität von $\chi = 0,7$ gewählt.

² Zur Anwendung der Rechenverfahren zur Bestimmung der Rauchausbeuten bei ventilationsgesteuerten Bränden gemäß [8.27] wurde ein globales Äquivalenzverhältnis von $\Phi = 2$ gewählt. Für brandlastgesteuerte Brände gilt $\Phi \ll 1$.

8.7 Literatur

- [8.1] *YAMADA, T.; AKIZUKI, Y.*: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer New York, 5th Ed. 2016.
- [8.2] *JOHN, R.*: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß. Teil 2. AG der Innenminister der Bundesländer. Forschungsbericht Nr. 50, Forschungsstelle für Brandschutztechnik der Universität Karlsruhe, 1983.
- [8.3] *JOHN, R.*: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß. Teil 4: Brandrauch und Sichtbarkeit von Hinweiszeichen in Rettungswegen. AG der Innenminister der Bundesländer. Forschungsbericht Nr. 66, Forschungsstelle für Brandschutztechnik der Universität Karlsruhe, 1988.
- [8.4] ISO 13571:2012-09 Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.
- [8.5] *MULHOLLAND, G. W.*: Smoke Production and Properties. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 4th Ed. 2008.
- [8.6] *BROWN, S. K.; MARTIN, K. G.*: A Review of the Visibility Hazard from Smoke in Building Fires, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization CSIRO, Division of Building Research, 1981.
- [8.7] Fire Code Reform Centre. Fire Engineering Guidelines, New South Wales, Australia, 2000.
- [8.8] *SCHNEIDER, V.; KÖNNECKE, R.*: Simulation der Personenevakuierung unter Berücksichtigung individueller Einflussfaktoren und der Ausbreitung von Rauch. vfdb-Zeitschrift 3 (1996) 98.
- [8.9] *WILK, E.; LESSING, R.*: Untersuchungen zur Sichtweite im Rauch und zu Brandgaswirkungen auf den Menschen, vfdb-Zeitschrift 3 (2004) 168.
- [8.10] *PURSER, D. A.; McALLISTER, J.L.*: Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer New York, 5th Ed. 2016.
- [8.11] *EINHORN, I. N.; GRUNNET, M. L.; PETAJAN, J. H.; BALDWIN, R. C.*: The Physiological and Toxicological Aspects of Combustion. 5. Int. Brandschutzseminar, vfdb, Nachträge S. 23, 1976.
- [8.12] ISO Technical Report TR 9122 - 5 Toxicity testing of fire effluents – Prediction of toxic effects of fire effluents. First edition, Stand 15.04.1993.
- [8.13] *CHRISTIAN, S. D.*: Safe tolerability limits for carbon monoxide? A review of the clinical and fire engineering implications of a single, acute sub-lethal exposure. Proceedings Interflam '99, Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, 1999.
- [8.14] vfdb-Richtlinie 10 / 03 – Schadstoffe bei Bränden. vfdb-Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, 3 (1997) 102 – aktualisiert August 2014.

- [8.15] *STENSAAS, J. P.*: Toxicity, visibility and heat stress of fire effluents – human tenability limits. SINTEF Report STF25 A91022, Trondheim, 1991.
- [8.16] *WILK, E.; LINDNER, D.; VOCK, R.*: Untersuchungen zum Inhalations-Hitzeschock, Archiv für Kriminologie Band 203, Seite 159-169, 1999.
- [8.17] *SCHÖNBUCHER, A.*: Berechnung von Sicherheitsabständen bei Störfällen mit brennbaren Stoffen. in: Hartwig, S.: Schwere Gase und Sicherheitsanalyse – IV. Proc. IV. Symp. Bonn. Sept. 1991, Batelle-Eigenverlag, Frankfurt am Main, 1992.
- [8.18] *BREIN, D.*: Evakuierungskonzepte – Anforderungen, Komponenten, Bewertungen. vfdb-Jahresfachtagung, Hamburg, 1997.
- [8.19] *SIEGFRIED, W.; WILL, J.*: Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. vfdb-Zeitschrift 3 (2002) 101.
- [8.20] *PURSER, D. A.*: Toxicity assessment of combustion products and human behaviour in fires. 10. Int. Brandschutzseminar, vfdb, 2005.
- [8.21] TNO: Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials – Green Book, 1992.
- [8.22] *BUFF, K.; GREIM, H.*: Abschätzung der gesundheitlichen Folgen von Großbränden, Zivilschutzforschung Band 25, Bundesamt für Zivilschutz 1997.
- [8.23] *BIESKE, K.; GALL, D.*: Evaluierung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen, Forschungsbericht im Auftrag des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften Sankt Augustin, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, März 2003.
- [8.24] *WILK, E.; WESKAMP, F.; LESSIG, R.*: Rauchbelastung in Rettungswegen und im Angriffsweg der Feuerwehr - Betrachtungen aus experimenteller und praktischer Sicht, vfdb-Zeitschrift 2 (2008) 73.
- [8.25] *SCHNEIDER, V.*: Erkennungsweite von Sicherheitszeichen in Rauch, vfdb-Zeitschrift 4 (2009) 188.
- [8.26] BSI British Standards: The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings, Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupant evacuation, behaviour and condition, PD 7974-6:2004.
- [8.27] *KHAN, M. M.; TEWARSON, A.; CHAOS, M.*: Combustion Characteristics of Materials and Generation of Fire Products i. V. m. Appendix 3, Table A.39. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Ed. 2016.
- [8.28] *FORELL, B.*: Bewertung der akuten Toxizität von Brandrauch. TÜ Bd. 51 (2010), Nr. 3, S. 20-29.
- [8.29] *ZHANG, Q.; RUBINI, P.*: Simulation of perceived visibility in smoke laden environment, 4. Int. Symposium on Human Behaviour in Fire, Cambridge, Juli 2009.
- [8.30] *SCHNEIDER, V.*: Modelling the visibility of emergency signs in smoke and smoke-free conditions, 4. Int. Symposium on Human Behaviour in Fire, Cambridge, Juli 2009.

8 Personensicherheit in Rettungswegen

- [8.31] *FORELL, B.*: Stand der Brandschutzingenieurmethoden zum Nachweis der Personensicherheit Teil 1: Gesamtkonzept und Bestimmung der verfügbaren Räumungszeit. S+S Report, Heft 3, S. 23-27, Juni 2010.
- [8.32] *FORELL, B.*: Niveau der Personensicherheit von Versammlungsstätten - Nachweis nach vfdb-Leitfaden. Tagungsband zur 56. vfdb Jahresfachtagung 2007, 21. bis 23. Mai, Leipzig. S. 294-317.
- [8.33] *WIEZOREK, M.; BÖTTGER, A.; FRANKE, E.*: Personensicherheit in rauchbelasteten Rettungswegen. Artikel aus: vfdb-Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, Jg. 63, Nr. 4, 2014, S. 188-197.

9 PERSONENSTROMANALYSE MIT RECHNERISCHEN NACHWEISVERFAHREN

9.1 Einleitung

Die Gewährleistung der Personensicherheit ist das zentrale Anliegen des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes. Um die dafür notwendigen baulichen, technischen und organisatorischen Maßnahmen verlässlich optimieren zu können, wird in der Praxis verstärkt nach leistungs- und schutzzielorientierten Lösungsansätzen gesucht. Dazu gehört, dass neben der Rauch- und Wärmeausbreitung auch die jeweilige Nutzungsart, Personenzahl sowie individuelle Personeneigenschaften und Verhaltensmöglichkeiten berücksichtigt werden, um erforderliche Brandschutzmaßnahmen festzulegen.

Abgeleitet aus dem im Katastrophenschutz üblichen Sprachgebrauch unterscheidet man vor allem auf planerischer Ebene zwischen den Begriffen "Räumung" und "Evakuierung". Unter Evakuierung versteht man die organisierte Verlegung aus einem gefährdeten Gebiet, wogegen Räumung das angeordnete Verlassen eines Gefahrengebietes bezeichnet. Räumung als kurzfristige und räumlich begrenzte Maßnahme trifft daher eher auf die Phase der Selbst- und Fremdreueung im Brandfall zu. Vor allem im Brandschutz wird dafür mitunter noch der Begriff "Entfluehtung" benutzt. In diesem Leitfaden wird einheitlich der Begriff „Räumung“ angewandt, um Vorgänge im Zusammenhang mit dem Verlassen eines Gebäudes oder Geländes nach einer Alarmierung oder in einer (tatsächlichen oder vermeintlichen) Gefahrensituation zu beschreiben. Berechnungsmethoden und Simulationsverfahren zur Analyse eines Räumungsvorgangs oder bestimmter Teilaspekte eines solchen werden zusammenfassend als „Personenstrommodelle“ bezeichnet. Diese Benennung verdeutlicht, dass entsprechende Modelle in der Regel nicht nur auf den Vorgang der Räumung beschränkt sind, sondern auch alltägliche Szenarien (z. B. die Einlasssituationen bei einer Veranstaltung) behandeln können. Entsprechend spricht man in diesem Zusammenhang auch allgemein von Personenstromanalysen.

Eine wesentliche Maßgabe für die Planung von Brandschutzmaßnahmen ist die Forderung, dass die für eine erfolgreiche Selbstrettung der Personen benötigte Zeitspanne (erforderliche Räumungszeit) kleiner ist als die Zeitspanne, innerhalb derer die Belastung durch Rauch- und Wärmeausbreitung innerhalb akzeptabler Grenzen bleibt (verfügbare Räumungszeit). Weiterhin ist durch die Personenstromanalyse sicherzustellen, dass auch die sonstigen Bedingungen des Räumungsablaufes nicht zu Situationen führen, welche die Personengefährdung erhöhen können (z. B. durch hohe Personendichten). Entsprechende Personenstrommodelle stehen, in abgestufter Komplexität, mittlerweile in Form von Berechnungsmethoden und computergestützten Simulationsverfahren für den Einsatz in der Praxis zur Verfügung.

9.2 Berechnung von Räumungszeiten

Für jeden Bereich eines Gebäudes gilt der Grundsatz, dass die erforderliche Räumungszeit $t_{\text{erforderlich}}$ kleiner sein muss als die verfügbare Räumungszeit $t_{\text{verfügbar}}$.

$$t_{\text{erforderlich}} < t_{\text{verfügbar}} \quad (9.1)$$

Dabei sind Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen, welche die Unsicherheiten bei der Wahl geeigneter Brandszenarien und Akzeptanzkriterien sowie geeigneter Räumungsszenarien erfassen. Diese können implizit berücksichtigt werden, indem geeignet konservative Anfangs- und Randbedingungen für die Szenarien zur Bestimmung der erforderlichen und verfügbaren Räumungszeit gewählt werden. Dies umfasst sowohl die Wahl der Brandszenarien nach Kapitel 4 in Verbindung mit den Akzeptanzkriterien nach Kapitel 8 als auch die in diesem Kapitel aufgeführten Randbedingungen einer Personenstromanalyse wie z. B. die Festlegung der Population (Zahl, Verteilung, Mobilitätsparameter) und die Fluchtwegwahl.

Alternativ kann ein expliziter Sicherheitsfaktor für $t_{\text{erforderlich}}$ durch die in Kapitel 10 beschriebenen Methoden des Sicherheitskonzepts eingeführt werden.

Die erforderliche Räumungszeit $t_{\text{erforderlich}}$ setzt sich zusammen aus der Zeitspanne $t_{\text{Detektion}}$ vom Beginn des Brandes (in der Regel der Zeitpunkt Null eines zeitabhängigen Bemessungsbrandes) bis zur Detektion des Brandes, der Zeitspanne t_{Alarm} von Detektion bis zum Auslösen des Alarms, einer Reaktionszeit t_{Reaktion} vom Auslösen des Alarms bis zum Beginn der Fluchtbewegung und der Zeit t_{Bewegung} vom Beginn der Fluchtbewegung bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches,

$$t_{\text{erforderlich}} = t_{\text{Detektion}} + t_{\text{Alarm}} + t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{Bewegung}} \quad (9.2)$$

wobei t_{Bewegung} gegebenenfalls auch eine Fremddrettung mit einschließt. Mikroskopische Modelle sind in der Lage, die Bewegungszeit t_{Bewegung} oder auch die Fluchtzeit $t_{\text{Flucht}} = t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{Bewegung}}$ konsistent aus der individuellen Bewegung aller beteiligten Personen zu bestimmen. Makroskopische Modelle berechnen t_{Bewegung} als Überlagerung einer für das Zurücklegen des Weges notwendigen Zeit t_{Weg} und einer für das Passieren der geometrischen Engpässe aufzuwendenden Zeit t_{Passage} .

9.3 Reaktionszeiten

In der Reaktionszeit werden unterschiedliche Effekte und Verhaltensweisen zusammengefasst, insbesondere:

- Zeit bis zum Wahrnehmen des Alarms,
- Zeit zur Interpretation der Wahrnehmung,
- Zeit für Handlungen, die nicht der unmittelbaren Flucht dienen (Untersuchung der Umgebung, Brandbekämpfung, Warnen oder Suchen von Personen, etc.).

Die Reaktionszeit hängt im Wesentlichen von der Aufnahmebereitschaft (wach / schlafend) der Personen, ihrer Vertrautheit mit dem Gebäude, der Qualität des Alarmierungssystems, der Komplexität des Gebäudes und der Qualität des Brandschutzmanagements ab. Für eine quantitative Festlegung können belegbare empirische Daten (z. B. aus unangekündigten Räumungsübungen) für das zu beurteilende Objekt oder vergleichbare Nutzungen herangezogen werden. Sind solche nicht verfügbar, kann auf Basis der folgenden Angaben eine Festlegung mit Hilfe der Kategorisierung nach Purser [9.1] erfolgen.

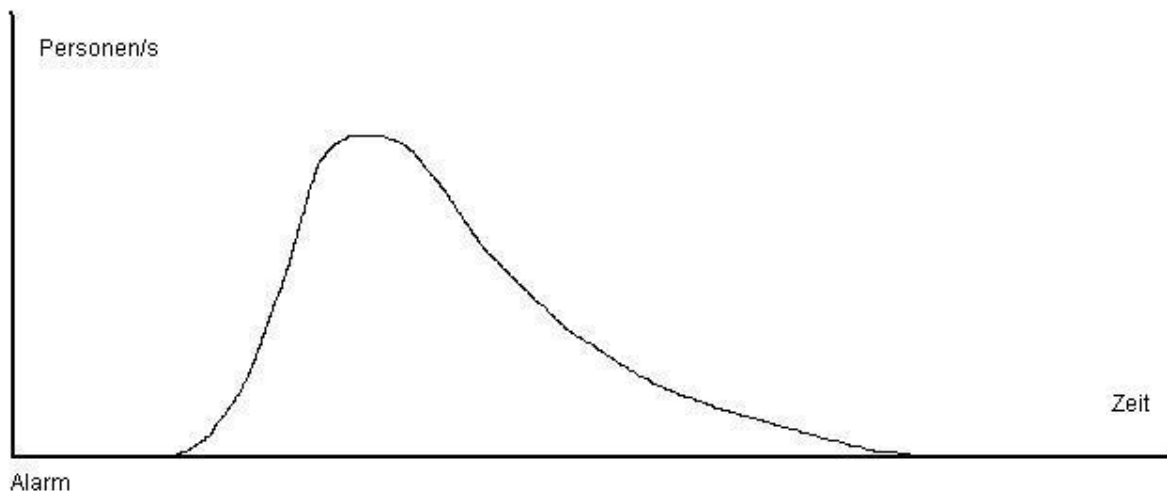


Bild 9.1 Schematische Darstellung einer typischen Reaktionszeit-Verteilung

Die individuellen Reaktionszeiten innerhalb einer Personengruppe folgen typischerweise einer Verteilung, wie sie in Bild 9.1 schematisch dargestellt ist.

Nach einer bestimmten Zeit relativ zum Zeitpunkt des Alarms setzen sich die ersten Personen in Bewegung. Ab diesem Zeitpunkt steigt die Anzahl der Personen, die mit der Fluchtbewegung beginnen, zunächst steil an, erreicht ein Maximum und klingt dann langsam ab. Der Verlauf der Reaktionszeit setzt sich also aus zwei Komponenten zusammen: der eigentlichen Verteilungsfunktion (näherungsweise durch eine logarithmische Normalverteilung beschrieben) und einem Zeitversatz dieser Verteilungsfunktion relativ zum Zeitpunkt des Alarms. Das Zeitintervall zwischen Alarm und beginnendem Anstieg (der Beginn der individuellen Reaktionszeit) lässt sich durch die 1 Perzentile Δt_1 der Reaktionszeiten der flüchtenden Personen charakterisieren, das Zeitintervall vom Beginn bis zum Ende der Reaktionszeit durch die 99 Perzentile Δt_{99} der Personenverteilung relativ zu Δt_1 , so dass sich für die individuelle Reaktionszeit ein Wert zwischen Δt_1 und $\Delta t_1 + \Delta t_{99}$ ergibt.

Δt_1 und Δt_{99} hängen von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Die wichtigsten dieser Faktoren lassen sich durch eine Kategorisierung hinsichtlich der typischen Nutzungsart des Gebäudes und einigen damit verbundenen grundsätzlichen Personencharakteristiken erfassen (Tabelle 9.1). Weitere wesentliche Einflussfaktoren wie Alarmierungssystem (Tabelle 9.2), Gebäudekomplexität (Tabelle 9.3) und Brandschutzmanagement (

Tabelle 9.4) werden durch entsprechende Unterkategorien berücksichtigt. Diese Unterkategorien sind jeweils dreistufig aufgebaut, wobei Stufe 1 den (hinsichtlich der Reaktionszeit) günstigsten und Stufe 3 den ungünstigsten Fall repräsentieren.

Tabelle 9.1 Kategorien zur Festlegung von Reaktionszeiten

Kategorie	Wachsamkeit	Vertrautheit	Dichte	typische Nutzungsarten
A	wach	vertraut	niedrig	Büro, Industrie
B	wach	unvertraut	hoch	Handel, Gaststätten, Versammlungsstätten
C(a)	schlafend	vertraut	niedrig	Wohnungen
C(b)	betreut	betreut	niedrig	Wohnheime
C(c)	schlafend	unvertraut	niedrig	Hotels, Herbergen
D	med. betreut	unvertraut	niedrig	medizinische Betreuung
E	Transport	unvertraut	hoch	Verkehrsanlagen

Tabelle 9.2 Alarmierungssystem

A1	automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung der betroffenen Bereiche
A2	automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung einer Zentrale und nachgeschalteter zeitverzögerter Alarmierung der betroffenen Bereiche
A3	keine oder nur lokale automatische Brandmeldung

Tabelle 9.3 Gebäudekomplexität

B1	einfache, überwiegend rechtwinklige Struktur, eingeschossig, nur wenige Räume bzw. Unterteilungen, einfacher Grundriss mit Ausgängen in Sichtlinie, kurze Wegstrecken, geeignete Vorkehrungen für direkt ins Freie führende Ausgänge (z. B. ein einfach strukturierter Supermarkt)
B2	einfacher Grundriss mit mehreren Räumen (auch mehrgeschossig), Bauweise entspricht überwiegend präskriptiven Vorgaben (z. B. einfaches Bürogebäude)
B3	großes, komplexes Gebäude

Tabelle 9.4 Brandschutzmanagement

M1	Personal bzw. ständige Gebäudenutzer sind in den Belangen des Brandschutzes gut ausgebildet. Es gibt Brandschutzhelfer bzw. Etagenbeauftragte, eine Gefahrenabwehr- und Notfallplanung sowie regelmäßige Schulungen und Räumungsübungen. In öffentlich zugänglichen Bereichen muss in Sicherheitsfragen geschultes Personal in angemessener Zahl vorhanden sein. In öffentlich zugänglichen Bereichen sollte ein Lautsprechersystem für Sprachalarmierung vorhanden sein.
M2	wie M1, jedoch mit einem geringeren Anteil an geschultem Personal. Brandschutzhelfer oder Etagenbeauftragte sind nicht erforderlich.
M3	Brandschutzmanagement entsprechend dem erforderlichen Mindeststandard hinsichtlich der Personensicherheit

Aus empirischen Daten (Räumungsübungen und reale Brandereignisse) gewonnene Reaktionszeiten Δt_1 (Startzeit) und Δt_{99} (zeitliche Spreizung der individuellen Reaktionszeit) sind in Tabelle 9.5 für die Kategorien A bis C und die zugehörigen Unterkategorien zusammengestellt. In Tabelle 9.5 kommen nicht alle theoretisch möglichen Kombinationen von Haupt- und Unterkategorie vor, da manche Kombinationen sich gegenseitig ausschließen. So ist beispielsweise ein Alarmierungssystem der Stufe A3 nicht verträglich mit einem Brandschutzmanagement der Stufen M1 oder M2. Für die Bestimmung der in Klammer gesetzten Zeitangaben der Tabelle 9.5 stand nur Datenmaterial in vergleichsweise geringem Umfang zur Verfügung, so dass diese Daten mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind.

Tabelle 9.5 Reaktionszeiten

Szenario (Haupt- und Unterkategorien)	Δt_1 [min]	Δt_{99} [min]
Kategorie A: wach und vertraut		
M1 B1 - B2 A1 - A2	0,5	1
M2 B1 - B2 A1 - A2	1	2
M3 B1 - B2 A1 - A3	(> 15)	(> 15)
B3: addiere 0,5 min zu Δt_1 wegen schwierigerer Orientierung		
Kategorie B: wach und unvertraut		
M1 B1 A1 - A2	0,5	2
M2 B1 A1 - A2	1	3
M3 B1 A1 - A3	(> 15)	(> 15))

Fortsetzung Tabelle 9.5

Szenario (Haupt- und Unterkategorien)	Δt_1 [min]	Δt_{99} [min]
B2: addiere 0,5 min zu Δt_1 wegen schwierigerer Orientierung		
B3: addiere 1,0 min zu Δt_1 wegen schwierigerer Orientierung		
Kategorie C(a): schlafend und vertraut		
M2 B1 A1	(5)	(5)
M3 B1 A3	(10)	(> 20)
Kategorie C(b): betreute Wohnanlagen		
M1 B2 A1 - A2	(10)	(20)
M2 B2 A1 - A2	(15)	(25)
M3 B2 A1 - A3	(> 20)	(> 20)
Kategorie C(c): schlafend und unvertraut		
M1 B2 A1 - A2	(15)	(15)
M2 B2 A1 - A2	(20)	(20)
M3 B2 A1 - A3	(> 20)	(> 20)
B3: addiere 1,0 min zu Δt_1 wegen schwierigerer Orientierung		

9.4 Personenstrommodelle

9.4.1 Allgemeines

Ähnlich den Raumbrandmodellen findet man auch bei den Personenstrommodellen sehr unterschiedliche Verfahren – von einfachen Handformeln bis hin zu komplexen rechnergestützten Simulationsmodellen. Es lassen sich dabei zwei Hauptgruppen unterscheiden:

- Strömungsmodelle (makroskopische Modelle) – inklusive Netzwerkmodelle,
- Individualmodelle (mikroskopische Modelle).

Die Strömungsmodelle (makroskopischen Modelle) erfassen im Wesentlichen die gerichtete Bewegung eines Personenstroms. Sie lassen sich weiter unterteilen in vereinfachte Berechnungsansätze zur Kapazitätsanalyse sowie Verfahren, welche auch die Dynamik der Bewegung einer größeren Menschenmenge näherungsweise berücksichtigen. Diese Methoden beschränken sich auf die für die Bewegung eines zusammenhängenden Personenstroms charakteristische Elemente der Rettungswegführung. Die Berechnungsschritte sind damit in der

Regel übersichtlich und leicht nachvollziehbar. Gemeinsam sind den Strömungsmodellen die folgenden Grundannahmen [9.2]:

- In der Regel beginnen alle Personen innerhalb des Personenstroms gleichzeitig mit der Räumung.
- Es gibt keine Unterbrechungen in dem sich mit Beginn der Räumung ausbildendem Personenstrom (z. B. durch individuelle Handlungsentscheidungen).
- Individuelle Mobilitätsparameter von Personen werden nicht betrachtet, sie fließen über gemittelte Werte mit ein (Geschwindigkeit des Personenstroms)

Diese Grundannahmen müssen zusammen mit den notwendigen Vereinfachungen, z. B. bei der Berücksichtigung der Gebäudegeometrie sowie bei der Modellauswahl insbesondere für die einfacheren Strömungsmodelle (Ansätze zur Kapazitätsanalyse) entsprechend berücksichtigt werden (z. B. durch geeignete Sicherheitszuschläge oder spezielle Randbedingungen [9.2]).

Die Individualmodelle (mikroskopische Personenstrommodelle) erfassen insbesondere Bewegungsmuster einzelner Personen. Sie lassen sich bezüglich der Abbildung der Gebäudegeometrie und der Verkehrsfläche in raumdiskrete (Zellularautomaten) und raumkontinuierliche Modelle unterscheiden. Mit der Simulation der Bewegung einzelner Personen in einer möglichst realitätsnahen Umgebung werden individuelle Einflüsse auf die Effizienz der Räumung stärker betont und Einschränkungen der Strömungsmodelle aufgehoben.

9.4.2 Abschätzung von Räumungszeiten durch Kapazitätsanalyse

Diese Berechnungsansätze basieren auf Relationen, welche die Kapazität eines Wegelements (Ausgang, Treppe oder Korridor) in Abhängigkeit von seiner Breite und gegebenenfalls auch anderen Parametern (z. B. Stufenabmessungen) beschreiben.

Grundlegende Eingabegrößen für die Anwendung von Kapazitätsanalysen sind die Weglänge L und Fluchtwegbreite B sowie die horizontale Geschwindigkeit V und der spezifische Personenstrom F_s . Die Größen V und F_s charakterisieren den zusammenhängenden Personenstrom als Ganzes für die Art des Wegelementes (z. B. Korridor, Engstelle, Treppe). Die Geschwindigkeit V ist daher nicht mit der unbehinderten ebenerdigen Gehgeschwindigkeit einer Einzelperson gleichzusetzen, die in Individualmodellen eine wichtige Rolle spielt (siehe Abschnitt 9.4.4).

Die Personendichte D verändert sich ortsabhängig im Laufe der Zeit. Da jedoch die Dichte nicht unmittelbar berechnet und nur ingenieurgemäß geschätzt werden kann, bezieht man sich bei der Berechnung von Räumungszeiten mittels Kapazitätsanalyse in der Regel nur auf für das Szenario typische mittlere Personendichten. Im SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [9.3] werden, basierend auf Fruins „Level of Service“ Konzept [9.4], vier Auslastungsgrade (crowd condition) unterschieden, die jeweils einem bestimmten Dichtebereich zugeordnet sind: Minimum ($D < 0,5 \text{ P./m}^2$), Moderate ($D \approx 1 \text{ P./m}^2$), Optimum ($D \approx 2 \text{ P./m}^2$), Crush ($D \approx 3 \text{ P./m}^2$).

Für die Berechnung von Räumungszeiten, bei denen wegen der Möglichkeit von Staubbildungen die Fluchtweg- bzw. Ausgangsbreiten ein wesentlicher Bemessungsfaktor sind, sind in der Regel nur die Optionen „Moderate“ (moderat) oder „Optimum“ (optimal) einzusetzen, die

9 Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren

auch empirisch am besten fundiert sind. Die Option „Crush“ bezieht sich auf besondere Gefahrensituationen, z. B. nicht benutzbare notwendige Ausgänge oder Notfallsituationen, die nicht mit einem Brandereignis in Zusammenhang stehen (Rowdytum, Terrorattacken) und ist daher in der Regel nicht für die Bemessung von Fluchtwegen geeignet. Die Option „Minimum“ beschreibt Personendichten unterhalb $0,5 \text{ P./m}^2$, also die Situation einer weitgehend unbehinderten Fortbewegung.

In der Praxis sollte mit mindestens zwei Werten gerechnet werden, sowohl mit „Moderate“ (moderat) oder „Optimum“ (optimal), um eine Spannbreite der Ergebnisse zu erhalten. Tabelle 9.6 zeigt Werte der mittleren horizontalen Geschwindigkeit V und des spezifischen Personenstroms F_s für moderate und optimale Auslastung. Dabei ist zu beachten, dass die zu Grunde liegenden Daten beträchtliche Schwankungsbreiten aufweisen. Neben den hier dargestellten Werten können auch solche aus anderen Quellen (z. B. Weidmann [9.5] oder Predtetschenski und Milinski [9.6]) für unterschiedliche Dichten abgeleitet werden (siehe 9.4.3).

Tabelle 9.6 Horizontale Geschwindigkeit und spezifischer Personenstrom für bestimmte Wegelemente [9.3], umgerechnet in SI-Einheiten.

Wegelement	Geschwindigkeit V	Personenstrom F_s
Treppe (moderate Auslastung)	0,6 m/s	0,8 P./s·m
Treppe (optimale Auslastung)	0,5 m/s	1,0 P./s·m
Korridor, Mundloch (moderate Auslastung)	1,0 m/s	1,1 P./s·m
Korridor, Mundloch (optimale Auslastung)	0,6 m/s	1,3 P./s·m
Ausgang, Türe (moderate Auslastung)	1,0 m/s	0,9 P./s·m
Ausgang, Türe (optimale Auslastung)	0,6 m/s	1,4 P./s·m

Für Treppen wird in Tabelle 9.6 die effektive horizontale Komponente der Geschwindigkeit V angegeben, welche gegenüber der ebenerdigen Gehgeschwindigkeit verlangsamt ist. Entsprechend beziehen sich die Weglängenangaben bei Treppen auf die horizontale Weglänge (Grundriss-Darstellung). Der spezifische Personenstrom F_s gibt an, wie viele Personen ein Wegelement pro Zeit- und Breitereinheit passieren können. Dabei ist die Auslastung des Wegelementes als Randbedingung zu berücksichtigen. Die Bewegungszeit t_{Bewegung} ergibt sich nun aus der größeren der beiden Zeiten, entweder für das Zurücklegen des Weges t_{Weg} oder der Zeit für das Passieren des Wegelementes mit der geringsten Durchlasskapazität t_{Passage} ,

$$t_{\text{Bewegung}} = \max \begin{cases} t_{\text{Passage}} \\ t_{\text{Weg}} \end{cases} \quad (9.3)$$

Für ein Wegelement, charakterisiert mit Index i , berechnet sich die Zeit für das Zurücklegen des Wegelementes

$$t_{\text{Weg},i} = L_i / V_i, \quad (9.4)$$

bzw. für die Passage des Wegelements einer bestimmten Personenzahl N

$$t_{\text{Passage},i} = N / (F_{s,i} \cdot B_i) \quad (9.5)$$

Für die Berechnung einer Bewegungszeit über mehrere Wegelemente ist zunächst das Wegelement mit der minimalen Kapazität (dem minimalen Fluss) zu bestimmen. Die Bewegungszeit ergibt sich dann entweder aus der längeren der beiden Zeiten für das Zurücklegen des maximalen Weges oder für die Passage des Wegelementes mit der maßgeblichen Kapazität addiert mit der Zeit für das Zurücklegen des minimalen Weges, der über das zuvor bestimmte maßgebliche Wegelement führt:

$$t_{\text{Bewegung}} = \max (\sum^{\text{max Weg}} L_i / V_i; \sum^{\text{min Weg}} L_i / V_i + N / \min (F_{s,i} \cdot B_i)) \quad (9.6)$$

Ähnliche, auf Bewegungsgeschwindigkeiten und Durchlasskapazitäten basierende Ansätze findet man auch in [9.30] und in Richtlinien für spezielle Anwendungsbereiche – z. B. die NFPA Richtlinie 130 „Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems“.

Eine konservative Abschätzung erhält man, wenn in Gleichung (9.6) für den minimalen Weg die Summe der Zeiten für das Zurücklegen aller Wegelemente, für die Durchgangszeit $N / (F_s \cdot B)$ jedoch nur diejenige für das einzelne Wegelement mit der längsten Durchgangszeit eingesetzt wird. Wenn dabei für das jeweilige Wegelement die Zahl aller auf dieses angewiesenen Personen N berücksichtigt wird, gilt dies ebenfalls allgemein auch für Rettungswege mit Vereinigungen. Für komplexere Szenarien wird jedoch der Einsatz eines dynamischen Strömungsmodells (siehe 9.4.3) oder eine mikroskopische Analyse (9.4.4) empfohlen, damit Änderungen der Personendichte und zeitliche Überlagerungseffekte entlang des Fluchtweges konsistent erfasst werden können.

In Fortführung der zu Grunde liegenden Fallbetrachtungen können ebenfalls verteilte Reaktionszeiten zur Abschätzung der Fluchtzeit berücksichtigt werden, wobei die Gleichung (9.6) wie folgt erweitert wird.

$$t_{\text{Bewegung}} = \Delta t_1 + \max (\sum^{\text{max Weg}} L_i / V_i; \sum^{\text{min Weg}} L_i / V_i + \max(N_i / (F_{s,i} \cdot B_i); \Delta t_{99})) \quad (9.7)$$

9.4.3 Makroskopische dynamische Strömungsmodelle

Im Rahmen der Strömungsmodelle können empirisch abgeleitete Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit V und Dichte D (Fundamentaldiagramme) verwendet werden, um die Auswirkungen von örtlich und zeitlich veränderlichen Personendichten zu beschreiben. Dies führt zu der Gruppe der dynamischen Strömungsmodelle, die auch dynamische Betrachtungen bei Vereinigung von Personenströmen ermöglichen.

Aus verschiedenen Forschungsarbeiten sind unterschiedliche Fundamentaldiagramme für die Anwendung von Räumungsanalysen veröffentlicht. Bis auf wenige Ausnahmen zeigen diese Fundamentaldiagramme grundsätzlich eine mit steigender Personendichte monoton fallende

Geschwindigkeit V , wobei unterschiedliche Funktionsverläufe $V(D)$ zu Grunde liegen (siehe Bild 9.2).

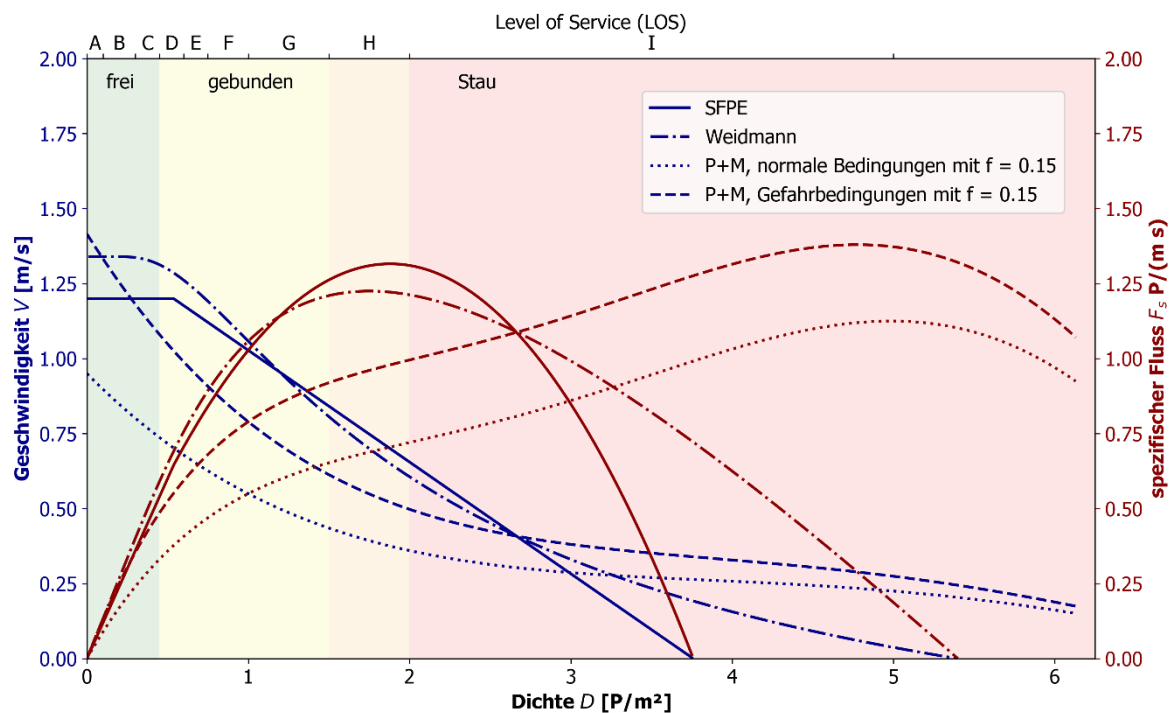


Bild 9.2 Beispielhafte Darstellung der Fundamentaldiagramme für ebene Wegabschnitte aus [9.2], [9.5] und [9.6]

In obigem Bild 9.2 ist die Personendichte den Levels of Service nach Weidmann [9.5] und entsprechend deren Beschreibung ebenfalls den Verkehrszuständen freie Bewegung, gebundener Verkehr und Stau zugeordnet. Im Sinne der Staudefinition (siehe Kapitel 9.6) stimmt diese Zuordnung mit seinem Fundamentaldiagramm [9.5] und dem im SFPE-Handbook [9.2] veröffentlichtem überein. Andere Fundamentaldiagramme wie z. B. Predtetschenski und Milinski [9.6] prognostizieren den Stau nach dieser Definition bei anderen Personendichten. Die Darstellung über das Fundamentaldiagramm verdeutlicht also den Übergang zwischen freiem Fluss und Stau: Am Wendepunkt der Flusskurve ist das System maximal ausgelastet. Höhere Dichten führen zu einer Überlastung und resultieren in einem verringerten Fluss, und somit in einem Stau. Zu beachten ist, dass neben den hier aufgeführten Fundamentaldiagrammen, abhängig der Personenzusammensetzung viele weitere Ausprägungen existieren: Sie haben jedoch alle gemein, dass ab einer bestimmten Dichte der Wendepunkt erreicht ist und das System in einen Stauzustand übergeht.

Im Rahmen des Modells der effektiven Breite wird als einfachste Ausprägung auf der Grundlage empirischer Daten eine lineare funktionale Abhängigkeit von Geschwindigkeit V und Personendichte D abgeleitet [9.2],

$$V = k - a \cdot k \cdot D \quad (9.7)$$

Den spezifischen Personenstrom F_s erhält man durch Multiplikation von Geschwindigkeit und Dichte,

$$F_s = V \cdot D \quad (9.8)$$

Die Konstanten $a = 0,266 \text{ m}^2/\text{P.}$ und k (siehe Tabelle 9.7) werden empirisch festgelegt. Der Gültigkeitsbereich von (9.7) wird mit $0,5 \text{ P./m}^2 < D < 3,7 \text{ P./m}^2$ angegeben. Der größte Teil der empirischen Daten liegt relativ breit gestreut in einem Dichtebereich zwischen 1 P./m^2 und 2 P./m^2 . D. h. der in Relation (9.7) postulierte lineare Zusammenhang zwischen V und D ist nicht eindeutig. Eine Zusammenstellung verschiedener Korrelationsfunktionen für die Dichteabhängigkeit von V bzw. F_s mit zum Teil auch nichtlinearen Abhängigkeiten findet man in [9.5]. Bei der Anwendung von (9.7) ist weiter zu beachten, dass die hier angegebenen Werte für die Konstanten a und k einer bestimmten („typischen“) Zusammensetzung der Personengruppe zugeordnet sind. Will man einen anderen Personenkreis (insbesondere solche mit anderen Mobilitätsparametern wie z. B. Personen mit Gepäck) beschreiben, müssen die Konstanten angepasst werden. Dies erfordert die Verfügbarkeit und Analyse von entsprechendem Datenmaterial und bereitet somit in der Praxis mitunter erhebliche Schwierigkeiten.

Tabelle 9.7 Geschwindigkeitskonstante k für bestimmte Wegelemente [9.2]

Wegelement	Konstante k
Korridor, Rampe, Türpassage	1,40 m/s
Treppe	
- Stufenhöhe 19,1 cm / Stufenbreite 25,4 cm	1,00 m/s
- Stufenhöhe 17,8 cm / Stufenbreite 27,9 cm	1,08 m/s
- Stufenhöhe 16,5 cm / Stufenbreite 30,5 cm	1,16 m/s
- Stufenhöhe 16,5 cm / Stufenbreite 33,0 cm	1,23 m/s

Setzt man (9.7) in (9.8) ein, ergibt sich für F_s eine quadratische Abhängigkeit von D , mit einem Maximum bei einer Personendichte von $1,9 \text{ P./m}^2$. Dies entspricht dem optimalen Auslastungsgrad, der oft in Handrechnungen eingesetzt wird.

Mit Hilfe der Gleichungen (9.3) bis (9.8) und zusätzlichen Regeln (teils direkt aus dem Strömungsmodell abgeleitet, teils auf zusätzlichen Annahmen hinsichtlich der Verteilung der Personen sowie des Aufspaltens und Verschmelzens von Personenströmen basierend) lassen sich so Gleichungssysteme aufstellen, die in einfachen Fällen noch per Hand lösbar sind, im Allgemeinen jedoch den Einsatz von Tabellenkalkulations- oder speziellen Computerprogrammen erfordern.

Ein weiteres Beispiel für ein dynamisches Strömungsmodell ist das von Predtetschenski und Milinski [9.6] entwickelte Verfahren. Wesentlicher Bestandteil dieser Berechnungsmethode ist eine Sammlung empirisch abgeleiteter Korrelationsfunktionen, welche die Dichteabhängigkeit der Geschwindigkeit V , separat für die einzelnen Wegelemente (horizontaler Weg, Durchgang, Treppe aufwärts, Treppe abwärts) und Bewegungsarten (Gefahr, normal, komfortabel), im Dichtebereich von nahe 0 bis zu einer empirisch begründeten maximalen Dichte D_{max} angeben (vgl. Bild A2.37 im Anhang). Damit ist es möglich, entweder für eine bekannte Dichte D die

Geschwindigkeit V (und damit zugleich den spezifischen Personenstrom, hier Bewegungsintensität q genannt) zu bestimmen oder umgekehrt für einen bekannten Wert von q eine entsprechende Dichte und die zugehörige Geschwindigkeit zu ermitteln. Durch die Einführung der auf die Lafebene projizierten individuellen Körperfläche f in der Definition der Personendichte wird ein gegenüber den zuvor beschriebenen Handrechnungen höheres Maß an Flexibilität erreicht. Ergänzt wird die Methode durch Gleichungen, welche andere Rettungswege als die Ebene sowie den Vorgang der Staubildung und des Stauabbaus beschreiben.

Die Methode von Predtetschenski und Milinski kann eingesetzt werden, sofern die Eigenschaften der Fluchtwege die Bildung eines Personenstroms einheitlicher Dichte gestatten. In langgestreckten Geometrien (z. B. Rettungswege in Tunnelanlagen) ist das Verfahren nur modifiziert verwendbar, weil es die Veränderung der Personendichte über die Länge des Personenstroms nicht berücksichtigt [9.29].

Netzwerkmodelle stellen die nächste Stufe der Erweiterung des hydraulischen Ansatzes dar. Dabei werden die für den Bewegungsfluss kritischen Wegelemente als Knoten eines verbundenen Systems dargestellt, welches die notwendigen Informationen zu Länge und Breite der Fluchtwege enthält. Da die Durchlassfähigkeit der Knoten durch empirische Relationen für die Dichteabhängigkeit des spezifischen Personenstroms bestimmt wird, sind diese Verfahren den dynamischen Strömungsmodellen zuzuordnen.

9.4.4 Individualmodelle

Bei der Anwendung von Individualmodellen (mikroskopischen Modellen) ist es im Gegensatz zu den Strömungsmodellen in der Regel nicht notwendig, die Dichteabhängigkeit der Gehgeschwindigkeit vorzugeben. Dieser zentrale, die Räumungszeit wesentlich beeinflussende Zusammenhang ist hier vielmehr ein Ergebnis der Modellierung elementarer individueller Bewegungsabläufe.

Wesentliche Eingabegrößen sind das Gebäude- bzw. Geländemodell (entweder dreidimensional oder in der Form zweidimensionaler Laufflächen, die räumlich verbunden sind) sowie die individuellen Personeneigenschaften. Letztere werden durch sogenannte Populationen beschrieben, welche durch Verteilungsfunktionen für die individuellen Mobilitätsparameter und weitere Kenngrößen zur Beschreibung individueller Verhaltensweisen (z. B. im Hinblick auf die Fluchtwegewahl) charakterisiert sind. Zu den wichtigsten Faktoren gehören hier der individuelle Platzbedarf, die individuelle Reaktionszeit und die individuelle Wunschgeschwindigkeit.

Man unterscheidet zwei Typen von Individualmodellen: räumlich diskrete und räumlich kontinuierliche Modelle. Bei den raumdiskreten Modellen werden die verfügbaren Laufflächen durch ein Gitter aus Zellen überdeckt. Die Individuen bewegen sich dann, in Abhängigkeit vom eigenen Ziel und von der angestrebten Bewegung der benachbarten Personen, von Zelle zu Zelle. Die Gitterstruktur kann zu Einschränkungen bei der Berücksichtigung der Variabilität individueller Mobilitätsparameter (Körpergröße, Gehgeschwindigkeit) und der Modellierung der individuellen Bewegung führen. So ist grundsätzlich die maximal darstellbare Personendichte durch die Zellgröße begrenzt und feingranulare Geometrien können weniger genau abgebildet werden.

Bei den raumkontinuierlichen Modellen ist die Lauffläche nur durch die tatsächlich vorhandenen Umfassungsbauteile und Hindernisse begrenzt. Außerdem sind die Personen nicht durch

eine Zellstruktur in ihren Körpermaßen beschränkt. Um hier die Kollisionsvermeidung der individuellen Bewegung abzubilden, muss in jedem Schritt auf Hindernisse und andere Personen in möglicher Kontaktdistanz geprüft werden. Kontinuierliche Modelle bieten daher ein großes Maß an Flexibilität, erfordern dafür jedoch in der Regel eine höhere Rechenkapazität. Zu den raumkontinuierlichen Modellen zählen neben den entscheidungsbasierten, das Schrittverhalten von Menschen nachahmenden Ansätzen (z. B. das Optimal Steps Model) auch die kräftebasierten Social Force Modelle, in denen die Bewegungsmodellierung von den umgebenden Personen und dem von ihnen ausgehenden Druck bestimmt wird.

Die meisten Individualmodelle enthalten die Möglichkeit, neben der Anfangsverteilung der Personen auch bestimmte individuelle Entscheidungen im Ablauf der Simulation zufallsgesteuert zu bestimmen. Damit erhält man bei der mehrfachen Berechnung des gleichen Szenarios unterschiedliche Ergebnisse, deren Streuung Aufschluss über verborgenes Optimierungspotential geben kann. Außerdem kann man direkt die ungünstigsten Resultate in die Sicherheitsanalyse einbeziehen und vermeidet somit ansonsten notwendige, jedoch nur schwer quantifizierbare Sicherheitszuschläge auf mittlere oder optimale Räumungszeiten.

Typische Vertreter der räumlich diskreten Individualmodelle sind buildingEXODUS [9.10], oder PedGo [9.11]. Den kontinuierlichen Ansatz verfolgen die Simulationsprogramme ASERI [9.12], SIMULEX [9.13], crowd:it [9.35], Pathfinder [9.36] und FDS+EVAC [9.37]. Eine umfassende Übersicht derzeit verfügbarer Personenstrommodelle findet man unter www.firemodelsurvey.com.

9.4.5 Modellauswahl und Anwendungsgrundsätze

Ein leistungsfähiges und aussagekräftiges Personenstrommodell sollte, um sinnvoll für die Entwicklung oder Bewertung eines Sicherheitskonzepts einsetzbar zu sein, die folgenden Eigenschaften aufweisen.

- Die Gebäudegeometrie sollte in allen für den Ablauf der Räumung wichtigen Details berücksichtigt werden können.
- Beschränkungen bezüglich der möglichen Fluchtwege sollten so weit als möglich vermieden werden, damit auch die Räumung von Bereichen mit größeren Freiflächen (Hallen, Versammlungsräume ohne feste Bestuhlung, Messegelände, Verteilerebenen in Bahnhöfen, Flughäfen oder Stadien, etc.) sinnvoll behandelt werden kann.
- Die den Räumungsprozess unmittelbar beeinflussenden individuellen Eigenschaften, insbesondere die durch den persönlichen Raumbedarf und die unbehinderte Gehgeschwindigkeit geprägte Mobilität, sind zu berücksichtigen.
- Falls erforderlich, muss die dynamische Ausbreitung von Rauch, toxischen Verbrennungsprodukten (insbesondere CO, CO₂ und HCN sowie gegebenenfalls Sauerstoffmangel) sowie die Hitzeeinwirkung bei der Berechnung von Räumungszeiten berücksichtigt werden (eingeschränkte Sichtweite, kritische Konzentrationswerte, Dosis-Wirkungs-Relationen). Mögliche Auswirkungen können sein: Nachlassende Orientierungsfähigkeit, Reduktion der Gehgeschwindigkeit, Umkehrverhalten, vollständige Blockade von Gebäudeabschnitten. Eine Reduktion der Gehgeschwindigkeit

keit setzt bei einem Sinken der Erkennungsweite auf etwa 5 m ein. In diesem Sichtbereich ist auch mit einem zunehmenden Umkehrverhalten bei der Konfrontation mit Rauch zu rechnen [9.32].

- Die Bestimmung des individuellen Fluchtweges sollte die Analyse von Fluchtwegalternativen zulassen.

Für eine Bemessung geeignete Räumungszeiten erhält man durch eine angemessen konservative Wahl der Szenarien. Dies kann im Rahmen einer Risikobeurteilung mit den Methoden nach Kapitel 10 erfolgen. Für die Festlegung von Szenarien sind neben der Geometrie des Gebäudes mindestens Angaben hinsichtlich der Personenzahl und deren Verteilung sowie der ggf. individuellen Mobilitätsparameter erforderlich. Die Berechnungsparameter (z. B. moderate statt optimale Auslastung in der Kapazitätsanalyse) sind für die Beurteilung der Robustheit des Ergebnisses zu variieren.

Mikroskopische Modelle sind besonders geeignet für Rettungswegsituationen, bei denen eine bestimmte Bewegungsrichtung der Personen nicht durch geometrische Verhältnisse oder durch das Bewegungsmuster einer Personengruppe vorgegeben ist, so dass individuelle Entscheidungen und Bewegungen angenommen werden müssen.

Die Verwendung computergestützter Individualmodelle erfordert hohe Sorgfalt bei der Auswahl der mitunter vielfältigen Einstellparameter. Hier müssen die Modellentwickler eine ausführliche und umfassende Validierung und Dokumentation erstellen, um dem Anwender alle für einen belastbaren rechnerischen Nachweis notwendigen Informationen zu liefern. Die Vorteile der Individualmodelle liegen in der besseren Erfassung der zeitlichen Auflösung eines Räumungsvorgangs, insbesondere bei komplexen Geometrien mit sich vereinigenden Personenströmen. Des Weiteren wird eine inhomogene Personengruppe selbst in einem Strömungsmodell wie dem von Predtetschenski und Milinski letztlich nur durch gemittelte Bewegungsparameter beschrieben, während sich in der Realität eine homogene Personengruppe schneller bewegt als eine heterogene Personengruppe mit gleichen durchschnittlichen Parametern. Die Verlangsamung des Personenstroms durch stattfindende Überholvorgänge kann nur mit einem Individualmodell erfasst werden. Bei der Anwendung von Strömungsmodellen muss dies mit den zu Grunde zu legenden Fundamentaldiagrammen berücksichtigt werden. Kurven oder Ecken im Rettungswegverlauf bzw. der Einfluss der Anströmrichtung auf Türen oder Treppenkönnen mit Strömungsmodellen lediglich über empirische Einflussfaktoren betrachtet werden. Bei Individualmodellen werden diese Einflüsse implizit über die Interaktion der Individuen untereinander und mit der umgebenden Geometrie berücksichtigt. Schließlich lassen sich Parameterstudien bei einmal erstellter Geometrie leichter durchführen und visualisieren.

Als Hilfestellung für die Modellauswahl sind in Tabelle 9.8 die Eigenschaften und Möglichkeiten der Modellklassen angegeben.

Tabelle 9.8 Modelleigenschaften als Hilfestellung zur Modellauswahl

	Makroskopisch		Mikroskopisch	
	Kapazitätsanalyse	dynamische Strömungsmodelle	Raumdiskrete Modelle	Raumkontinuierliche Modelle
<u>Aussagefähigkeit zu:</u>				
Fluchtzeit bzw. Bewegungszeit	Ja	Ja	Ja	Ja
Staustelle (Wo entsteht ein Stau)	Eingeschränkt	Ja	Ja	Ja
Staudichte	Nein	Nein (festgelegt)	Nein (durch Zellgröße limitiert)	Eingeschränkt
Staugröße (Anzahl der Personen im Stau)	Nein	Ja	Ja	Ja
Stauzeit (Lebensdauer Stauereignis)	Eingeschränkt	Ja	Ja	Ja
Individuelle Wartezeit	Nein	Eingeschränkt	Ja	Ja
Räumliche Ausdehnung eines Staus	Nein	Eingeschränkt (festgelegte Staudichte)	Eingeschränkt (abhängig von der Zellgröße)	Eingeschränkt (abhängig vom Platzbedarf und der Staudichte)
<u>Abbildungseigenschaften von:</u>				
Flucht- und Rettungswege	Abschnittsweise mit konstanten Eigenschaften	Abschnittsweise mit konstanten Eigenschaften	durch festgelegte Zellgröße	Kontinuierlich (exakt)
Gehgeschwindigkeit und Personeneigenschaften	Konstant gemittelt	i.d.R. konstant gemittelt	Individuell	Individuell
Vereinigung von Personenströmen	Nein	Ja	Ja	Ja

9.4.6 Validierung

Für den Einsatz eines Personenstrommodells als rechnerisches Nachweisverfahren im Rahmen des vorbeugenden Brandschutzes gelten die gleichen grundsätzlichen Forderungen hinsichtlich Validierung und Dokumentation wie für die Modelle zur Berechnung der Rauch- und Wärmeausbreitung. Für eine Validierung können herangezogen werden

- Vergleiche mit Räumungsexperimenten,

- Vergleiche mit Räumungsübungen,
- Vergleiche mit realen Räumungsereignissen,
- Vergleiche mit anderen ausreichend validierten Rechenverfahren.

Um bestimmte Aspekte individuellen Verhaltens (z. B. Reaktionszeit oder Fluchtwegwahl) in den Validierungsprozess einbeziehen zu können, sind – mangels geeigneter Daten aus realen Brandereignissen – insbesondere Vergleiche mit unangekündigten Räumungsübungen oder der Gebäuderäumung nach Großereignissen wertvoll. So wurden z. B. verschiedene makroskopische und mikroskopische Modelle anhand von mehreren, durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten, Räumungsübungen in Bürohochhäusern für diesen Anwendungsbereich validiert [9.7], [9.16], [9.17].

9.5 Verhaltensaspekte

9.5.1 Allgemeines

Das individuelle Verhalten im Brandfall kann in allen Phasen der Räumung Auswirkungen zeigen, welche die Gesamträumungszeit beeinflussen und unter Umständen deutlich vergrößern. Die zuvor unter dem Begriff „Reaktionszeit“ zusammengefassten Verhaltensweisen und Handlungen können in der Regel für die Berechnung von Räumungszeiten pauschal (d. h. durch ein additives Zeitintervall wie in Relation 9.2 – auf individueller oder globaler Ebene) behandelt werden. Sonderfälle, die eine genauere Analyse dieser Frühphase der Räumung erforderlich machen könnten, sind z. B. relevante Veränderungen der anfänglichen Verteilung der Personen im Gebäude innerhalb der Reaktionszeit (etwa während der Phase der Informationssuche).

9.5.2 Wahl des Fluchtweges

Die Berechnung von Räumungszeiten erfordert im Rahmen der Szenarienfestlegung immer Angaben zur Aufteilung der Personen auf die verfügbaren Fluchtwege. Bei den in den Abschnitten 9.4.2 und 9.4.3 vorgestellten makroskopischen Modellen genügt es, die Anzahl der Personen festzulegen, die ein Wegelement oder einen Ausgang passieren. Bei den mikroskopischen Verfahren (Abschnitt 9.4.4) muss der individuelle Weg bestimmt werden, entweder durch explizite Vorgabe oder durch implizite Bewegungs- bzw. Verhaltensregeln. Nur mit diesen Individualmodellen ist es möglich, individuelle Verhaltensaspekte explizit bei der Fluchtwegwahl zu berücksichtigen.

In einer Situation, in der Personen an einer Stelle ihres Weges die Auswahl zwischen zwei oder mehreren Wegen haben, muss eine Zuordnung der Personen auf diese Fluchtwegalternativen begründet erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass eine optimale (im Sinne einer minimalen Gesamtfluchtzeit) Auslastung einen in der Praxis bestenfalls näherungsweise erreichbaren Idealzustand darstellt. Es gilt zu berücksichtigen, welche Informationen für eine Wegentscheidung zur Verfügung stehen und wie diese auf Grund individueller Umstände (Vertrautheit mit dem Gebäude, Erfahrung mit ähnlichen Situationen, soziale Einflussfaktoren, etc.) verarbeitet werden können. Dabei gibt es vier Hauptkriterien für die Auswahl von Fluchtwegen [9.15]: Kenntnis des jeweiligen Fluchtweges, Häufigkeit in der täglichen Benutzung, kürzeste Entfernung bis zum Ausgang, Wahrnehmung von Rauch oder anderen Hindernissen. Zur Kenntnis des Weges gehören neben der allgemeinen Ortskenntnis (Vertrautheit) auch das

Vorhandensein und die Qualität der Fluchtwegkennzeichnung und gegebenenfalls auch eines Informationssystems sowie - in der Praxis von besonderer Bedeutung - das Einwirken von Personal oder von Einsatzkräften. Neben der Weglänge spielt auch die subjektiv empfundene Qualität (Breite, Ebenmäßigkeit, Übersichtlichkeit, Ausleuchtung) des Fluchtwegs eine wichtige Rolle. Außerdem muss situationsbedingt unterschieden werden, ob sich Personen einer unklaren Gefahrenlage gegenübergestellt sehen oder ob sie vor einer konkreten unmittelbaren Gefahr fliehen. In ersterem Fall wird eher die Länge des gesamten Fluchtweges bis zum Verlassen des Gebäudes den Ausschlag geben (vertrauter Weg), im zweiten Fall die Länge des Wegs bis zum nächsten verfügbaren Ausgang aus dem gefährdeten Raum oder Bereich (lokal kürzester Weg). Weitere Einflussfaktoren sind die Beschaffenheit der Notausgänge (Türen offen oder geschlossen, direkter Ausgang ins Freie) sowie das Verhalten der anderen Personen im Umfeld.

Ein zusätzlicher, gerade für Gebäude mit großer Personenzahl bzw. hoher Personendichte wesentlicher Aspekt der Fluchtwegwahl ist das individuelle Verhalten bei Staubildungen. Dies führt zu der Frage, unter welchen Bedingungen eventuell verfügbare alternative Fluchtwege zur Vermeidung eines Staus oder zur Reduzierung der Wartezeit in einem Stau akzeptiert werden.

Leider gibt es zurzeit noch zu wenig empirisches Datenmaterial, um diese qualitativen Attraktivitätskriterien umfassend zu quantifizieren. Es ist also in der Regel erforderlich, basierend auf den oben genannten Kriterien mögliche Schwankungsbreiten bei der Auslastung der Fluchtwege abzuschätzen und deren Auswirkungen durch eine Sensitivitätsanalyse zu untersuchen. Grundsätzliche Fragen der rechnerischen Umsetzung sowie Anwendungsmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen verschiedener Nachweisverfahren wurden z. B. in [9.33] genauer untersucht.

9.5.3 Verhalten bei unmittelbarer Gefahr

Zu dem oft in die Diskussion eingebrachten Begriff „Panik“ ist folgendes anzumerken. „Panik“ wird in sehr unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Ereignisse, die einer streng wissenschaftlichen Definition dieses Phänomens genügen, stehen in keinem kausalen Zusammenhang mit der Räumung von Gebäuden. Dagegen wird insbesondere in den Medien sehr häufig ohne die notwendige Differenzierung der Begriff „Panik“ zur Beschreibung oder als Erklärungsmuster für Vorfälle mit Personenschäden im Gedränge oder in bewegten Menschenmengen herangezogen. Solche Berichte sind ohne eine genauere Analyse des tatsächlichen Hergangs jedoch ungeeignet für weiterreichende Schlussfolgerungen.

Tatsächlich wird von Experten auf dem Gebiet des menschlichen Verhaltens im Brandfall immer wieder das überwiegend zögerliche oder hilfsbereite Verhalten gegenüber dem oft behaupteten dominanten egoistischen oder irrationalen Verhalten betont [9.8], [9.9], [9.20]. Oft wird das lokale Auftreten extrem hoher Personendichten, bei der es zu ernsthaften Verletzungen oder gar Todesfällen kommen kann, fälschlicherweise mit dem Begriff „Panik“ bezeichnet. Betrachtet man reale Ereignisse dieser Art, so resultieren sie entweder aus Situationen, in denen eine schnelle Brandausbreitung kombiniert mit unzureichenden Fluchtwegen (z. B. durch das unrechtmäßige Versperren von Notausgängen oder durch von Anfang an nicht ausreichend bemessene Fluchtwege) rasch ein unkontrollierbares Gefahrenpotential aufbaut oder aus Situationen, die nicht im Zusammenhang mit einem Brand stehen (z. B. Flucht vor Krawall

oder Zustrom von Personen in bereits überfüllte Bereiche). Die erstgenannte Situation wird durch die Grundforderung einer schutzzielorientierten Bemessung von Fluchtwegen – erforderliche Räumungszeit kleiner als verfügbare Räumungszeit – im Rahmen der in diesem Kapitel beschriebenen Methoden ausreichend behandelt. Das Vermeiden von Situationen mit extrem hohen lokalen Personendichten ist durch die geeignete Planung von Wegführung und Ausweichmöglichkeiten im Rahmen eines umfassenden Sicherheitskonzepts sicherzustellen, was gegebenenfalls auch geeignete organisatorische Maßnahmen einschließt.

Durch die Anwendung von Personenstrommodellen sollen also mögliche Problemsituationen vorhersehbar gemacht und die Untersuchung von Alternativen ermöglicht werden. Einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand zum Verhalten von Menschen bei Bränden bieten die Veröffentlichungen [9.18] bis [9.24].

9.6 Staubildung

9.6.1 Allgemeines

Neben der erforderlichen Räumungszeit als quantitatives Beurteilungskriterium spielt auch die Qualität des Räumungsablaufs eine wichtige Rolle. Unter „Qualität“ ist hier u. a. die Entwicklung der lokalen Personendichte auf den Rettungswegen und daraus resultierende Stausituationen zu verstehen. Staubildungen lassen sich nicht grundsätzlich vermeiden und führen nicht notwendigerweise zu Personengefährdungen oder Personenschäden. Abhängig von der Personenzahl, den (geometrischen) Randbedingungen und dem Reaktionsverhalten können sich Stauungen zeitweise in der Anfangsphase der Räumung ausbilden. Beispielhaft sei hier der Räumungsvorgang auf einer Tribüne oder in einem Kino genannt. In beiden Fällen müssen sich Personenströme an vielen Stellen vereinen, um anschließend einen Ausgang zu erreichen. Hierbei kommt es zu sehr kleinen Bewegungsgeschwindigkeiten und zeitweise auch zum Stillstand. Innerhalb der weiterführenden Rettungswege sollten Staubildungen möglichst vermieden werden. Nicht akzeptabel sind Staubildungen in unübersichtlichen Bereichen, da hier für die in dem Stau befindlichen Personen ein deutlich erhöhtes Maß der Gefährdung durch nachrückende Personen besteht (Staudruck). Kriterien zum Nachweis eines „sicheren Räumungsverlaufs“ werden in [9.31] diskutiert. Um diese einleitenden Überlegungen weiter zu konkretisieren ist es zunächst erforderlich, die für die Beschreibung des Stauphänomens anzuwendenden Begriffe zu definieren und die Möglichkeiten und Grenzen ihrer rechnerischen Umsetzung aufzuzeigen. Darauf aufbauend lassen sich Kriterien für eine Klassifizierung bzw. Bewertung eines Staus erstellen.

9.6.2 Definition von Stau

Ein Stau entsteht immer dann, wenn ein eingehender Personenfluss an einer Stelle den ausgehenden bzw. maximal möglichen Personenfluss auf diesem Wegabschnitt übersteigt. Die Staubildung geht immer mit einer Reduktion der Geschwindigkeit, möglicherweise bis zum Stillstand, und zumeist mit einer Erhöhung der Personendichte einher.

Ein Stau ist aufgrund seiner Definition über die Größe des Personenflusses prinzipiell ein makroskopisches Phänomen, das auch Auswirkungen auf die Bewegungsparameter einzelner Personen hat. Aus dieser Feststellung ist auch abzuleiten, dass für das Auftreten eines Staus eine gewisse Mindestanzahl von Personen erforderlich ist.

Für hinzukommende Personen im Stau ergibt sich ein zusätzlicher Zeitbedarf gegenüber einem freien oder gebundenen Personenfluss.

9.6.3 Identifizierung von Stau in Personenstrommodellen

Um die Stauererkennung durchzuführen, können unterschiedliche Kriterien herangezogen werden. Diese Kriterien beziehen sich entweder auf den Stau als Ganzes (makroskopisch) oder auf die Individuen innerhalb des Staus (mikroskopisch).

Individuelle Kriterien (mikroskopisch):

- die für eine Person verfügbare Verkehrsfläche (resultiert in Personendichte),
- Geschwindigkeitsreduktion (lokale Geschwindigkeit deutlich geringer als Wunschgeschwindigkeit),
- Zeitverlust,
- Verweildauer im Stau,
- Weglänge, die im Stau zurückgelegt wurde.

Kriterien auf Ebene des Staus (makroskopisch):

- die Dauer des Staus vom Auftreten bis zur Auflösung,
- die Zahl aller gleichzeitig am Stau beteiligten Personen,
- die Lage und Ausdehnung (Fläche) des Staus,
- die Summe der insgesamt am Stau beteiligten Personen.

Die diesen charakteristischen Merkmalen zugrundeliegenden Größen haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile (siehe auch Tabelle 9.8). Für makroskopische Berechnungsmodelle können die makroskopischen Kriterien zur Beschreibung eines Staus herangezogen werden. Zur Identifikation eines Staus ist ausschließlich das Flusskriterium aus obiger Definition anzuwenden.

Für mikroskopische Berechnungen wird folgendes Kriterium empfohlen:

Geschwindigkeit

Eine Stauererkennung anhand der Geschwindigkeit als charakteristische Größe ist grundsätzlich umsetzbar. Es kann das Verhältnis zur Wunschgeschwindigkeit oder die absolute Geschwindigkeit als relevante Kenngröße eingesetzt werden. Als Schwellenwert kann die Geschwindigkeit V herangezogen werden, die dem maximalen spezifischen Fluss zugeordnet (siehe auch Bild 9.2) ist. Als Alternative zu einem festen Schwellenwert besteht auch die Möglichkeit, für jedes Modell anhand definierter Szenarien eine Kalibrierung zur Bestimmung eines geeigneten und nachvollziehbaren Schwellenwertes durchzuführen.

9.6.4 Personendichte

Die lokale Personendichte als Kriterium zur Bewertung der Personensicherheit, insbesondere bei Veranstaltungen mit hohem Besucherandrang, wird ausführlich in [9.34] diskutiert. Bei Personendichten von 3 - 5 Personen/m² ist mit einem zeitweisen lokalen Stillstand im Personenstrom zu rechnen. Bei höheren Personendichten können Personen nicht mehr ausweichen

und durch nachströmende Personen auftretende Druckwellen sind nicht zu kompensieren. In diesem Fall besteht eine große und unmittelbare Gefahr für die betroffenen Personen.

In der praktischen Anwendung werden daher häufig Dichten zur Beurteilung von kritischen Situationen herangezogen (siehe Anmerkungen in Abschnitt 9.5.3).

Die Stauererkennung anhand von Dichte in Berechnungsmodellen vorzunehmen ist jedoch nicht empfehlenswert: Bei makroskopischen Ansätzen ist die einem Staubereich zugeordnete Personendichte ein Vorgabewert. Bei mikroskopischen Modellen kann die lokale Personendichte zwar berechnet werden, jedoch ergeben sich hinsichtlich der darstellbaren maximalen lokalen Personendichten deutliche, zum Teil systematische, Unterschiede zwischen den Modellen. Erschwerend kommt hinzu, dass es unterschiedliche Definitionen für die Dichtemessung gibt. Hier müsste also zusätzlich ein Konsens zur Vereinheitlichung gefunden werden.

9.6.5 Beurteilung von Stau

Im Gegensatz zu einem Stau als verkehrstechnischem Phänomen, können Staus bei hohen Personendichten zu Personenschäden führen. Es ist daher relevant, die identifizierten Staus zu beurteilen. Eine Beurteilung kann jedoch lediglich auf Grundlage der bekannten Größen erfolgen.

Das Erkennen eines signifikanten Staus ist die Grundlage dafür, ein Szenario näher zu untersuchen. Die Einstufung eines signifikanten Staus als kritisch kann nur unter Berücksichtigung der aus der konkreten Situation resultierenden spezifischen Randbedingungen erfolgen. Kriterien für einen signifikanten Stau sind sowohl das Verhindern des Abflusses aus einem kritischen Bereichs als auch die individuelle Anstehzeit. Letztere ist relevant, da hier die Psychologie des Menschen eine Rolle spielt. Allerdings fehlt es hier an belastbaren empirischen Daten, die eine (gegebenenfalls situationsabhängige) Schwelle für die individuelle Anstehzeit liefern könnten.

9.7 Personenzahl

Die Personenzahl, die einem Sicherheitskonzept bzw. einer Personenstromanalyse zu Grunde zu legen ist, hängt von der Gebäudegröße (Geschossfläche) und der Art der Nutzung ab. Dabei wird entweder eine der Nutzung entsprechende Personendichte (in der Regel repräsentativ für eine empirisch belegbare Spitzenbelastung) mit der zugehörigen Geschossfläche multipliziert oder direkt die maximale Zahl der Personen, für welche die Nutzung ausgelegt ist (z. B. maximale Anzahl der Plätze in einem Stadion), herangezogen.

Tabelle 9.9 zeigt eine Zusammenstellung der Personenbelegung in Abhängigkeit von der Nutzungsart auf der Grundlage entsprechender Richtlinien bzw. Verordnungen aus den USA, Großbritannien, Neuseeland und der Schweiz [9.25] bis [9.28]. Die dort gemachten Angaben zur Personendichte zeigen für gleiche oder ähnliche Nutzungen manchmal erhebliche Streuungen, wobei in der Regel der höchste Wert übernommen wurde. Außerdem findet man in den Originalquellen teilweise zusätzliche, hier nicht explizit aufgeführte Unterscheidungen (z. B. hinsichtlich der Geschosszahl), so dass für weitere Details auf die zitierten Regelwerke verwiesen wird. Einen Vergleich solcher Richtlinien mit den Gegebenheiten bei realen Brandereignissen findet man in [9.1]. Bezugsgröße ist die nutzbare Nettfläche (Fläche innerhalb des

9 Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren

inneren Umfangs der Außenwände, abzüglich Treppenhäuser, Liftanlagen, Sanitäranlagen, Innenwände etc.).

Tabelle 9.9 Personenbelegung für verschiedene Nutzungsarten *)

Nutzung	Personendichte [P./m ²]
Stadion, Tribüne, Theater, etc.	
- Stehplätze	5,0
- freie Bestuhlung	2,0
- feste Bestuhlung	Anzahl der Sitzplätze
- Lobby / Foyer	1,0
Passagen, Umgänge (bei Nutzung als Versammlungsstätte)	1,4
Kunstgalerie, Museum	0,25
Bibliothek	
- Lesesaal	0,2
- Magazin	0,1
Ausstellung, Messe	0,6
Spielcasino	1,0
Trainingsraum, Fitnesscenter	
- mit Geräten	0,2
- ohne Geräte	0,7
Gaststätte, Restaurant	1,0
Bar, Club, Diskothek	4,0
Schule	
- Klassenzimmer	0,5
- Labor / Übungsraum	0,2
Tagesstätten	0,3
Verkaufsgeschäfte	
- Bereich (Geschoss) mit Zugang ebenerdig	0,5
- sonstige Geschosse	0,3
Einkaufsmarkt (für Großgeräte, Möbel, etc.)	0,1
Ausstellungsraum	0,2

Fortsetzung Tabelle 9.9

Nutzung	Personendichte [P./m ²]
Büro	0,2
Schwimmbad	
- Wasserbecken	0,2
- Ruhe- und Spielbereich	0,35

*) Hinweis: Da aus den zugrunde liegenden Quellen [9.25] bis [9.28] in der Tendenz jeweils die höchsten spezifischen Personendichten entnommen wurden, kann es insbesondere bei großflächigen Nutzung wie ausgedehnten Verkaufsstätten zu einer Überschätzung der Personenzahl kommen.

9.8 Literatur

- [9.1] *PURSER, D.*: Data Benefits. Fire Prevention Fire Engineers Journal, August 2003, pp. 21 - 24.
- [9.2] *GWYNNE, S.M.V.; ROSENBAUM, E.R.*: Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer New York, 5th Ed. 2016.
- [9.3] *PAULS, J.*: Movement of People. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2nd Ed. 1995.
- [9.4] *FRUIN, J.J.*: Pedestrian Planning and Design, Revised Ed., Elevator World Educational Services Division, Mobile, AL, 1987
- [9.5] *WEIDMANN, U.*: Transporttechnik der Fußgänger, Schriftenreihe des IVT (Literaturstudie Nr. 90). Zürich: Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, 1993.
- [9.6] *PREDTETSCHENSKI, W. M.; MILINSKI, A. I.*: Personenströme in Gebäuden – Berechnungsmethoden für die Projektierung, Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1971.
- [9.7] *KENDIK, E.*: Die baulichen Rechtsnormen in Bezug auf die Bemessung der Fluchtwege in Gebäuden. vfdb-Zeitschrift 2 / 86, S. 48 - 54.
- [9.8] *FAHY, R.F.; PROULX, G.*: 'Panic' and human behaviour in fire, National Research Council Canada NRCC-51384, July 13, 2009.
- [9.9] *KÜNZER, L.*: Myths of Evacuation, FeuerTRUTZ International 1.2016, Seite 8-11.
- [9.10] *GWYNNE, S.; GALEA, E. R.; LAWRENCE, P. J.; FILIPPIDIS, L.*: Simulating Occupant Interaction with Smoke Using buildingEXODUS. 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire, Boston, MA, 26. - 28. März 2001.
- [9.11] *KESSEL, A.; KLÜPFEL, H.; WAHLE, J.; SCHRECKENBERG, M.*: Microscopic Simulation of Pedestrian Crowd Motion. Tagungsband International Conference on Pedestrian Evacuation Dynamics (PED), 4. - 6. April 2001, Duisburg.

- [9.12] *SCHNEIDER, V.; KÖNNECKE, R.*: Simulation der Personenevakuierung unter Berücksichtigung individueller Einflussfaktoren und der Ausbreitung von Rauch. *vfdb-Zeitschrift* 3 (1996), S. 98 - 109.
- [9.13] *THOMPSON, P.A.; MARCHANT, E. W.*: A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations. *Fire Safety Journal* 24 (1995), S. 131 - 148.
- [9.14] *BREIN, D.*: Evakuierungskonzepte – Anforderungen, Komponenten, Bewertungen. *vfdb-Jahresfachtagung*, Hamburg, 1997.
- [9.15] *MÜLLER, K.*: Die Evakuierung von Personen aus Gebäuden – nach wie vor ein nationales und internationales Problem. *vfdb-Zeitschrift* 3 (1999) 131.
- [9.16] *SCHNEIDER, V.*: Modelle für die Flucht und Rettung von Personen. 9. Internationales Brandschutz-Symposium der *vfdb*, 25. / 26. Mai 2001, München.
- [9.17] *JOHN, R.; SEEGER, P.*: Untersuchung der Räumungsabläufe in Gebäuden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswegen – Teil III: Reale Räumungsversuche, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe im Auftrag des Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 1978.
- [9.18] *PHILLIPS, A. W.*: The Effects of Smoke on Human Behavior. *Fire Journal*. May 1978.
- [9.19] *CANTER, D. (Hrsg.)*: Fires and Human Behaviour. 2. Ed., David Fulton Publishers Ltd, London, 1990.
- [9.20] *SIME, J.*: "The concept of 'panic.'" In D. Canter (Ed.), *Fires and human behaviour* (2nd ed.), David Fulton Publishers, London, pp. 68, 1990.
- [9.21] *SCHNEIDER, V.*: Verbundprojekt Simulation von Bränden, Lösch- und Notfallmaßnahmen – Teilprojekt Brand- und Rauchausbreitung, Evakuierungsmodell. BMFT-Abschlussbericht 13 RG 91141, 1994.
- [9.22] *STEIN, J.*: Verhalten von Menschen bei Bränden, Brandschutz – Deutsche Feuerwehrzeitung 4 / 1999, S. 308 - 315.
- [9.23] *HELBING, D. ET AL.*: Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. in: Schreckenberg, M.; Sharma, S. D. (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, 2002.
- [9.24] *BRYAN, J. L.*: Behavioral Response to Fire and Smoke. in: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd Ed. 2002.
- [9.25] The Building Regulations 2000, Edition 2006 Fire Safety, Approved Document B, Volume 2 – Buildings other than Dwelling Houses, 2006 Edition, Department for Communities and Local Government.
- [9.26] *BUCHANAN, A. H. (Hrsg.)*: Fire Engineering Design Guide, Centre of Advanced Engineering, Christchurch, New Zealand.
- [9.27] NFPA 101 Life Safety Code, 2000 Edition.

- [9.28] *HESS, E.*: Neue Kompetenzordnung und flexiblere Brandschutzkonzepte mit den neuen „Schweizerischen Brandschutzvorschriften“ VKF, Braunschweiger Brandschutz-Tage 2005.
- [9.29] *STEGLICH, M.; WILK, E.*: Bestimmung der Zeiten für den Ausstieg von Personen aus Zugeinheiten und die Verteilung langgestreckter Personenströme im Ergebnis von Beobachtungen und Zeitmessungen, Brandschutz Consult - Ingenieurgesellschaft mbH, Leipzig, 2002.
- [9.30] BSI British Standards: The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings, Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupant evacuation, behaviour and condition, PD 7974-6:2004.
- [9.31] *FORELL, B.; KLÜPFEL, H.; SCHNEIDER, V.; SCHELTER, S.*: Vergleichende Anwendung verschiedener Räumungsmodelle. Tagungsband zur 59. vfdb Jahresfachtagung 2011, 30. Mai bis 1. Juni, Berlin, S. 465-493. Online verfügbar unter <http://www.rimea.de/downloads.html>.
- [9.32] *PURSER, D. A.*: Toxicity Assessment of Combustion Products. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd Ed. 2002.
- [9.33] *SCHNEIDER, V.*: Einfluss der Fluchtwegewahl auf Räumungszeiten und Evakuierungseffizienz, vfdb-Zeitschrift 2/2008, Seite 87 - 93.
- [9.34] *OBERHAGEMANN, D. (Hrsg.)*: Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen, vfdb Technischer Bericht TB 13-01, 2012.
- [9.35] *SEITZ, M. S.; KÖSTER, G.*: Natural discretization of pedestrian movement in continuous space, American Physical Society, PHYSICAL REVIEW E, 2012, 86, 046108
- [9.36] *THORNTON, C.; O'KONSKI, R.; HARDEMAN, B.; SWENSON, D.*: Pathfinder: An Agent-Based Egress Simulator, Pedestrian and Evacuation Dynamics (R.D. Peacock, E.D. Kuligowski, J.D. Averill, Editors), Springer 2011, Seite 889 – 892
- [9.37] *KORHONEN, T.; HOSTIKKA, S.; HELIÖVAARA, S.; EHTAMO, H.; MATIKAINEN, K.*: FDS+Evac: Evacuation Module for Fire Dynamics Simulator, Proceedings of the Interflam2007: 11th International Conference on Fire Science and Engineering, Inter-science Communications Limited, London, UK, 2007, Seite 1443–1448.

10 RISIKOMETHODEN UND SICHERHEITSKONZEPT

10.1 Allgemeines

Voraussetzung für die Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz ist die Aufrechterhaltung des gesellschaftlich akzeptierten brandschutztechnischen Sicherheitsniveaus, das sich über einen längeren Zeitraum anhand der jährlichen Anzahl der Brandtoten und der Brandschadenssummen festmachen lässt. Um dies zu gewährleisten, sollen Ingenieurmethoden in Verbindung mit einem globalen Sicherheitskonzept angewendet werden. Die wesentliche Bedingung an das Sicherheitskonzept ist die Gültigkeit für alle gängigen Verfahren und Modelle:

- Bauteilbemessung,
- Auslegung von Entrauchungsanlagen,
- Berechnung von Räumungszeiten.

Ganz allgemein umfassen die Anforderungen an ein globales Sicherheitskonzept für den vorbeugenden Brandschutz die Definition von Regeln und Methoden, mit denen Bauwerke brandschutztechnisch ausreichend sicher und zudem wirtschaftlich bemessen, ausgeführt und genutzt werden können. Die Ziele des Sicherheitskonzeptes sind

- die Gewährleistung ausreichender Sicherheit für
 - Gebäudenutzer und
 - Einsatzkräfte der Feuerwehr sowie die
- Dimensionierung der Brandschutzmaßnahmen, so dass
 - Todesopfern und Verletzten vorgebeugt wird und
 - Folgen eines Konstruktionsversagens minimiert werden.

Naturgemäß vermittelt ein Sicherheitskonzept zwischen der im öffentlichen Interesse liegenden Sicherheit einerseits und der angestrebten Wirtschaftlichkeit andererseits. Eine ausreichende Sicherheit liegt vor, wenn z. B. das Versagen eines Bauwerkes im Brandfall innerhalb der geplanten Nutzungsdauer nur mit einer akzeptierbar kleinen Wahrscheinlichkeit (Zielversagenswahrscheinlichkeit) auftritt.

Bei der Bemessung der baulichen Brandschutzmaßnahmen müssen die Unsicherheiten und Parameterstreuungen in den verwendeten ingenieurtechnischen Nachweisen durch die Wahl geeigneter Bemessungswerte abgedeckt werden, damit ein brandbedingtes Versagen mit angemessener Zuverlässigkeit vermieden wird. Diese Bemessungswerte werden in Übereinstimmung mit dem Teilsicherheitskonzept der konstruktiven Eurocodes über charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte definiert. Die damit erreichte Zuverlässigkeit bzw. das verbleibende Restrisiko ist für den Aufsteller von Nachweisen nicht erkennbar.

Für eine risikoorientierte Bewertung des Brandschutzes werden neben deterministischen Ingenieurmethoden zur wirklichkeitsnahen Erfassung der Brandeinwirkungen und des Verhaltens der Baukonstruktion oder der Personen während des Brandes auch probabilistische Methoden benötigt, um Ausfallwahrscheinlichkeiten von Brandschutzmaßnahmen aufgrund von Unsicherheiten und Streuungen der Rechenmodelle und der zugehörigen Eingangsgrößen zu

ermitteln und daraus eine Versagenswahrscheinlichkeit des Brandschutzes zu berechnen. Diese kann dann mit Vorgaben für die von der Gesellschaft bisher akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit bzw. die mindestens erforderliche Zuverlässigkeit verglichen werden.

Im Gegensatz zum englischsprachigen Raum und Skandinavien werden in der deutschen Praxis Risikomethoden zur Bewertung des vorbeugenden Brandschutzes in Gebäuden bisher nur in Ausnahmefällen, z. B. bei Kernkraftwerken, eingesetzt. Bisher gibt es auch keine einheitliche statistische Erfassung und Auswertung von Brandfällen, die Aussagen hinsichtlich der Wirksamkeit des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes liefern könnte. Deshalb sind belastbare statistische Daten zur Brandauftretenshäufigkeit, zur Brandausbreitungswahrscheinlichkeit und der Zuverlässigkeit von baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen in Deutschland Mangelware. Hier ist man bislang auf internationale Literaturangaben angewiesen, deren Übertragbarkeit auf deutsche Verhältnisse nicht gesichert ist. Derzeit gibt es Bestrebungen in Deutschland entsprechende Daten einheitlich zu erfassen. Sofern diese Daten noch nicht gesichert vorliegen, sollte bei der Anwendung der nachstehenden Methoden überprüft werden, wie weit die vorliegenden Daten für den Einzelfall geeignet sind.

Zur Analyse des Brandrisikos und für Risikovergleiche zwischen verschiedenen Gebäuden, Nutzungen oder Brandschutzkonzepten gibt es unterschiedliche Techniken oder Vorgehensweisen, die sich grob in qualitative und quantitative Risikomethoden einteilen lassen. Hier sollen nur folgende Methoden näher betrachtet werden

- Semi-quantitative *Index-Methode* [10.2]
- Quantitative *Ereignisbaumanalyse* [10.3]
- Quantitative *Systemzuverlässigkeitsanalyse* [10.3].

Zunächst werden in Kapitel 10.2 die für ingenieurtechnischen Anwendungen in der Praxis geeignet erscheinenden semi-quantitativen Risikomethoden erläutert. Danach werden in Kapitel 10.3 die für genauere Untersuchungen sowie zur Herleitung vereinfachter Methoden gedachten quantitativen Methoden der Ereignisbaum- und Systemzuverlässigkeitsanalyse zusammenfassend vorgestellt.

10.2 Semi-quantitative Risikomethoden

Die Index-Methoden oder Ranking-Methoden stellen Verfahren dar, mit denen die Brandrisiken in unterschiedlichen Gebäuden abgeschätzt und untereinander verglichen werden können. In den letzten Jahrzehnten wurden Index-Methoden für unterschiedliche Anwendungsgebiete entwickelt (Tabelle 10.1).

Als Ergebnis der Bewertung wird eine Zahl, der Risikoindex, ermittelt. Bei Änderungen in der baulichen Struktur oder Änderungen der anlagentechnischen Maßnahmen kann mit dem Verfahren erneut der Risikoindex errechnet und mit dem vorherigen Wert verglichen werden. Auf diese Weise kann man sich iterativ einem Grenzwert für den Sicherheitsindex annähern, der als Maß für das von der Gesellschaft (oder im Einzelfall) akzeptierte Risiko festzulegen ist. Beim Vergleich der Zahlenwerte für ein bestimmtes Gebäude oder für mehrere vergleichbare Gebäude lassen sich die günstigsten oder ungünstigsten Zustände hinsichtlich des Brandrisikos erkennen und Maßnahmen optimieren.

Die Methode liefert jedoch keine quantitativen Angaben zum tatsächlichen Brandrisiko, sondern lediglich Relativaussagen, wie sicher ein Gebäude im Vergleich zu einem anderen bzw. vor und nach einer Ertüchtigung ist.

Einige der in Tabelle 10.1 aufgeführten Verfahren basieren auf Datengrundlagen, die bis in die 1960er Jahre zurückreichen. Beispielsweise wurde mit der Inkraftsetzung der Schweizer VKF-Brandschutzvorschriften 2015 das Berechnungsverfahren nach SIA 81 in Form der Brand-schutzerläuterung 115-03 zurückgezogen.

Tabelle 10.1 Beispiele für semi-quantitative Risikomethoden

Methode	Anwendung	Entwickler
Fire Safety Evaluation System (FSES)	Gebäude für Büros, Laboratorien, Wohnungen	NIST, USA [10.4]
ISO Specific Commercial Property Evaluation Schedule (SCOPEs)	Handelshäuser	ISO Standard [10.5]
Dow Fire and Explosion Index (FEI)	Prozessplanung, Schadensbeurteilung	Dow Chemical [10.5]
Expert system Fire Insurance Risk Evaluation (XPS FIRE)	industrielle Gebäude	Münchner Rück-Versicherung [10.6]
Hierarchical Approach	unterschiedliche Gebäude	University of Edinburgh, Schottland [10.7]
Brandrisikobewertung - Berechnungsverfahren (SIA 81)	industrielle Gebäude	Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA) [10.8]
Fire Risk Assessment Method for Engineering (FRAME)	unterschiedliche Gebäude	De Smet, Belgien [10.9]
Fire Risk Index Method – Multi Storey Apartment Buildings (FRIM-MAB)	mehrgeschossiges Wohngebäude	Lund University, Schweden [10.10], [10.11], [10.12]

Die Index- oder Ranking-Methoden sind semi-quantitative Methoden, die häufig mit dem Ziel einer vereinfachten, schematisierten Risikoeinstufung für bestimmte Gebäudearten entwickelt wurden. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit des Verfahrens und seiner Eingangsgrößen liegt beim Anwender. Bei der Entwicklung des Verfahrens werden die Eingangsgrößen z. B. durch Expertenbefragungen durch den Ersteller festgelegt. Die Übertragbarkeit dieser Angaben auf das konkrete Problem muss gesichert sein.

In der Regel wird eine Gruppe von Experten beteiligt, die jeden einzelnen Faktor, der das Risiko positiv (Erhöhung des Sicherheitsniveaus) oder negativ (Abnahme des Sicherheitsniveaus) beeinflussen kann, erörtert. Über die Wertigkeit jedes Faktors wird auf der Basis von Wissen der Experten und ihrer jahrelangen Erfahrung in den Bereichen der Versicherung, Feuerwehr, Genehmigungsbehörden und Wissenschaft entschieden.

Wegen der einfachen Anwendung stellen die Index-Methoden ein kosteneffektives Werkzeug dar. Die strukturierte Art der Entscheidungsfindung erleichtert das Verständnis bei den Nutzern und ermöglicht es, neue Erkenntnisse und Technologien einfach in das System einzuführen.

Index-Methoden werden seit über 50 Jahren im Brandschutz verwendet. Es stehen Methoden zur Lebensrettung in Wohngebäuden [10.13], Hochhäusern [10.10], Hotels [10.14] sowie zum Gebäudeschutz von Industriegebäuden [10.8] zur Verfügung.

10.3 Quantitative Risikomethoden

10.3.1 Einführung

Mit quantitativen Risikomethoden können Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten einzelner Ereignisse in Gebäuden erfasst werden. Es gibt verschiedene Modelle (Tabelle 10.10), die sich in ihren Lösungsansätzen unterscheiden.

Ein Beispiel ist die Ereignisbaumanalyse (Event Tree Analysis, ETA), welche als quantitative Methode für Planungsprozesse individuell eingesetzt werden kann. Zusammen mit deterministischen Ingenieurmethoden können alle erforderlichen Informationen, die zur Bewertung eines Gebäudes herangezogen werden sollen, quantitativ dargestellt und auf ihre Übereinstimmung mit den Anforderungen, z. B. aufgrund gesetzlicher Vorgaben, überprüft werden.

Bei der Anwendung der ETA ist es oft notwendig, eine große Anzahl von Brandszenarien mit unterschiedlichen Randbedingungen zu berücksichtigen. Jedem Ereignis, Brandverlauf oder Szenario kann eine Auftretenswahrscheinlichkeit zugewiesen werden. Die ETA ermöglicht es, den zeitlichen Verlauf der untersuchten Ereignisse ausgehend von einem Brandbeginn zu bewerten und zu strukturieren. Bei der Entwicklung eines Ereignisbaums für das zu untersuchende Objekt können auch menschliches Verhalten und die Zuverlässigkeit eingebauter Brandschutzanlagen berücksichtigt werden.

Ein weiterer Vorteil der ETA ist, dass sie aufgrund ihres Binärsystems (ja / nein) und ihrer logischen graphischen Darstellung mit Symbolen leicht zu verstehen ist. International wird die ETA als anerkanntes Nachweisverfahren für brandschutztechnische Bewertungen in unterschiedlichen Gebäudearten verwendet [10.16] (siehe Tabelle 10.10).

Tabelle 10.2 Beispiele für die Anwendung quantitativer Risikomethoden

Methoden	Verwendung	Entwickler
Computation of Risk Indices by Simulation Procedures (CRISP)	Personenrisiko	Fire Research Station (BRE), UK [10.17]
Fire Risk Evaluation and Cost Assessment Model (FiRECAM)	Bürogebäude	National Research Council, Canada [10.18]
Event Tree Analysis (ETA)	alle Gebäudearten	Verschiedene [10.19], [10.20]
Fire Risk analysis with Reliability Index β	alle Gebäudearten Stufe 3	Verschiedene [10.21], [10.22]

10.3.2 Ereignisbaumanalyse (ETA)

Für die Anwendung einer Ereignisbaumanalyse sind zunächst Maßnahmen zu identifizieren, welche einen großen Einfluss auf die Sicherheit der Personen oder die Gebäudekonstruktion haben können. Die sind z. B. unterschiedliche Brandorte (Bereich, Raum, Abtrennungen zum Rest des Gebäudes, Brandherd) und Brandlasten (Brandentwicklung, Brandausbreitung, Ventilationsbedingungen) sowie bauliche, anlagentechnische und organisatorische Schutzmaßnahmen.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Komponenten des Ereignisbaumes ist unter Umständen auf Grundlage einer rechnerischen Analyse zu ermitteln. Dies kann z. B. eine Bauteilberechnung oder Räumungssimulation sein, jeweils unter Berücksichtigung des mit diesem Ast in Verbindung zu bringenden Brandereignisses und relevanten Versagenskriterien. Dies können einfachere Rechenverfahren wie Handgleichungen oder Computersimulationen sein (vgl. Kapitel 5, 6 und 8). Die Wahl des Verfahrens hängt von der Komplexität des zu untersuchenden Gebäudes und den Zielsetzungen der Analyse ab. Außerdem kann der Anwender ggf. auf Datenbanken zurückgreifen oder sich auf Literaturangaben, Erfahrungswerte und sein eigenes technisches Urteil stützen.

Je nach Komplexität und Größe des zu untersuchenden Gebäudes können z. B. folgende Ereignisse mit Fallunterscheidungen im Ereignisbaum betrachtet werden:

- Ort des Brandes, Art des Raumes
 - Büro,
 - Flur,
 - Atrium, etc.
- Abschluss im Brandraum
 - Tür auf / Tür zu,
 - Wände,
 - Wanddurchbrüche,
- Tageszeit (Tag / Nacht),
- Brandmeldung (ja / nein),
- Rauch- und Wärmeableitung (ja / nein),
- Löschversuche durch Personal (ja / nein),
- Brandbekämpfung durch Löschanlage (ja / nein),
- Brandbekämpfung durch Feuerwehr (ja / nein).

Das Verfahren der Ereignisbaumanalyse kann in fünf Schritte gegliedert werden:

- Erfassung von Angaben zu den Sicherheitseinrichtungen und -funktionen (sowohl in technischer als auch organisatorischer Hinsicht),
- Aufbau des Ereignisbaums,

- Quantifizierung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Sicherheitseinrichtungen und – funktionen aller Komponenten des Ereignisbaums
- Erfassen der bedingten Ausfallwahrscheinlichkeit von jedem Ast des Ereignisbaums,
- Quantifizierung der Ergebnisse (Resultierende Ausfallwahrscheinlichkeit $P_{f,i}$ je Ast bzw. gesamt $P_{f,Summe}$).

Grundlage der Analyse sind unterschiedliche Brandszenarien, für die jeweils die Brandentwicklung und die Maßnahmen im Rahmen eines Räumungsprozesses berechnet werden. Der Ereignisbaum ist ein logisches Diagramm, das sich vor allem für die Darstellung der Reihenfolge der Ereignisse eignet. So können die Auswirkungen von der Brandentstehung, über die Brandentwicklung, die Kontrolle des Brandes sowie den Rettungsverlauf erfasst werden.

Der Anwender des Verfahrens muss darauf achten, dass er im Ereignisbaum alle für den Brandverlauf relevanten Ereignisse (z. B. geschlossene oder offene Tür, blockierter Fluchtweg, Versagen der Brandmeldeanlage bzw. der Sprinkleranlage) erfasst, wodurch sich jeweils weitere Szenarien ergeben.

Bild 10.1 zeigt einen einfachen Ereignisbaum für Brandszenarien, die sich bei der Funktion bzw. dem Ausfall einer Sprinkleranlage und der baulichen Trennung durch eine Tür einstellen können. Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines jeden Szenarios $P_{f,i}$ wird berechnet, indem die Wahrscheinlichkeit eines speziellen Ereignisses, hier des Brandausbruchs, mit den Wahrscheinlichkeiten der jeweils folgenden Ereignisse (Funktion oder Ausfall) auf diesem betreffenden Ast des Ereignisbaums multipliziert wird. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass überhaupt ein Schaden infolge eines Brandereignisses eintritt ist möglich und ergibt sich aus der Summe der Auftretenswahrscheinlichkeit der Szenarien $P_{f,i}$. Zur Betrachtung der Schutzzieleinhaltung soll das Ausmaß der Brandausbreitung berücksichtigt werden.

Je nach Definition des Schutzziels wäre es beispielsweise möglich, dass ein Schutzziel eingehalten ist, wenn der Brand auf den Ursprungsraum begrenzt bleibt. In diesem Fall wäre der Ast mit einer funktionierenden Löschanlage und einem funktionierenden Feuerschutzabschluss nicht in die Gesamtsumme einzurechnen, obwohl im Raum ein Brand aufgetreten ist.

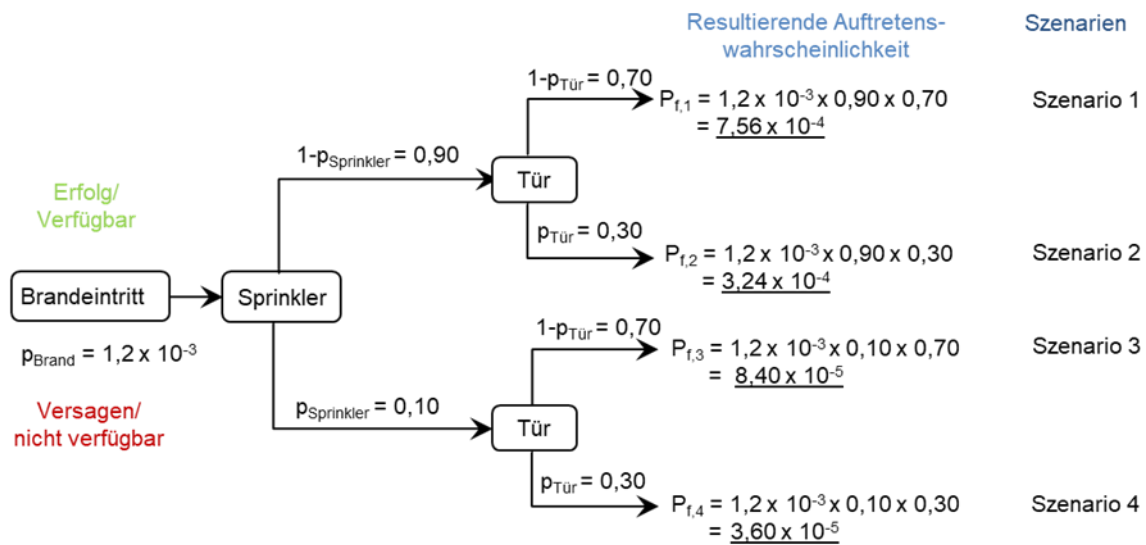


Bild 10.1 Beispiel eines Teils eines einfachen Ereignisbaums

Die Methodik soll anhand eines einfachen Beispiels erläutert werden. Dazu erfolgt zunächst eine Schutzzieldefinition.

Schutzzieldefinition 1: Ein lokaler Schaden wird akzeptiert, eine Brandübertragung über den Brandraum hinaus erfolgt nicht. Dies ist der Fall, wenn entweder die Löschanlage oder der Feuerschutzabschluss wirksam ist.

Schutzzieldefinition 2: Gebäudeverlust möglich, Brand verlässt Brandraum. Dies ist der Fall, wenn Löschanlage und der Feuerschutzabschluss versagen

Die Auftretenswahrscheinlichkeit ergibt sich nun durch Auswertung des Ereignisbaums in Abhängigkeit der Schutzzieldefinition.

Schutzzieldefinition 1: Ein Schaden tritt im Szenario 2 und 3 ein.

$$P_{f,\text{Summe}} = P_{f,2} + P_{f,3} = 3,24 \times 10^{-4} + 8,4 \times 10^{-5} = 4,08 \times 10^{-4}$$

Schutzzieldefinition 2: Ein Schaden tritt nur im Szenario 4 ein.

$$P_{f,\text{Summe}} = P_{f,4} = 3,6 \times 10^{-5}$$

10.3.3 Durchführung einer quantitativen Risikoanalyse

Die Methodik der quantitativen Risikoanalyse soll anhand einer gegenüber dem Kapitel 10.3.2 vertiefenden Betrachtung verdeutlicht werden.

Diese Risikoanalyse ist in der realen Anwendung komplex und abhängig von der jeweilig untersuchten Fragestellung. Im Hinblick auf die Personensicherheit ist das zu erwartende Schadensausmaß beispielsweise hoch, wenn die ermittelte Zeitdauer bis zum Erreichen von Grenzwerten für Personen auf der Flucht kürzer ist als die erforderliche Fluchtzeit aus dem Gebäude. Betrachtet man das Tragwerk, können Schäden auftreten, wenn die Temperatur der Heißgas-schicht z. B. 300 °C übersteigt. Je höher die Temperatur in einem Szenario werden kann, desto höher ist bis zu einer gewissen Grenze in der Regel auch das Schadensausmaß. Aus

dem Produkt von Auftretenswahrscheinlichkeit p_i und Schadensausmaß S_i ergibt sich der Risikobeitrag R_i für das jeweilige Szenario und ein Wert für das Gesamtrisiko durch Summation der Einzelbeiträge. Aus den Risikobeiträgen der Szenarien kann dann durch Vergleich abgelesen werden, wo risikomindernde Maßnahmen im Hinblick auf das jeweilige Schutzziel erforderlich sind bzw. am meisten Einfluss haben.

Diese Zusammenhänge sollen an einem Beispiel verdeutlicht werden. Es wird die Brandausbreitung in einer größeren Nutzungseinheit untersucht. Der eintretende Schaden S_i wird vereinfacht als vom Brand betroffene Fläche angegeben, in Abhängigkeit der Brandentwicklungsgeschwindigkeit und der Dauer des Brandes. In der Regel begrenzen Maßnahmen wie

- der Brand wird von Gebäudenutzern gelöscht,
- der Brand wird von Sprinklern unterdrückt oder
- der Brand wird von der Feuerwehr kontrolliert,

die Brandausbreitung und damit das Schadensausmaß S_i im jeweiligen Szenario. Die Auftretenswahrscheinlichkeit p_i des sich aus dem Versagen bzw. dem Erfolg der Maßnahmen ergebenden Szenarios ist abhängig von der Wahrscheinlichkeit des Versagens bzw. Erfolg der jeweiligen (Schutz-)Maßnahmen.

Auf Basis der so ermittelten Risikobeiträge R_i , aus den Auftretenswahrscheinlichkeiten p_i und dem jeweiligen Schadensausmaß S_i kann nun die Risikobewertung erfolgen. Der häufigste Grund für die Anwendung einer Risikobewertung im Brandschutz ist ein möglichst effizienter Einsatz der Mittel bei akzeptablem Schadensausmaß.

In der Risikoanalyse sind viele Einflussgrößen als stochastische Variablen zu betrachten. Der Anwender sollte im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersuchen, wie sich Unsicherheiten auf das Gesamtergebnis auswirken, z. B.:

- Variation der Eingangsdaten,
- Vereinfachungen in Modellen,
- Zuverlässigkeit technischer Anlagen,
- Einfluss offener Türen, ungeeigneter Maßnahmen etc.

In einer abschließenden Bewertung der getroffenen Schutzmaßnahmen werden die mit ingenieurtechnischen Verfahren ermittelten Brandwirkungen und / oder das jeweilige Schadensausmaß mit den hierzu festgelegten Schutzzielen verglichen. Werden die Schutzziele nicht erreicht, werden zusätzliche Maßnahmen zur Ertüchtigung des Gebäudes erforderlich. Durch Vergleich unterschiedlicher Alternativen können optimale Lösungen gefunden werden, die den gesetzlich vorgeschriebenen Schutz für die Nutzer (ggf. ein höheres Schutzniveau) mit geringst möglichem Aufwand bieten. Andererseits können einzelne Szenarien im Ereignisbaum oder Ereignisse in diesen Szenarien ausgesondert werden, weil sie mit Blick auf die Schutzziele für die Risikobetrachtung nicht relevant sind.

10.4 Sicherheitskonzept für den konstruktiven Brandschutz

10.4.1 Voraussetzungen und Grundlagen

Das im Folgenden vorgestellte Sicherheitskonzept für Nachweise des konstruktiven Brandschutzes mit Hilfe der Eurocode-Brandschutzteile wurde in [10.23] entwickelt. Es ist für

- unterschiedliche Bauweisen (Beton, Stahl, Verbund, Holz, Mauerwerk),
- unterschiedliche Nutzungsarten (Regelbauten und Sonderbauten),
- unterschiedliche Brandeinwirkungen (Naturbrandbeanspruchung),
- unterschiedliche rechnerische Nachweisverfahren (vereinfachte und allgemeine Bemessungsverfahren nach den Eurocode-Brandschutzteilen)

gleichermaßen anwendbar und berücksichtigt folgende brandschutztechnischen Randbedingungen:

- Brandentstehungshäufigkeit (nutzungsabhängig),
- Brandausbreitungswahrscheinlichkeit (nutzungsabhängig),
- Verfügbarkeit und Wirksamkeit anlagentechnischer Maßnahmen,
- Verfügbarkeit und Wirksamkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr.

Die Eingangsgrößen für die Ermittlung der Brandeinwirkungen weisen stochastische Streuungen, statistische Unsicherheiten und ggf. Modellunsicherheiten auf, denen durch eine geeignete Wahl von Bemessungswerten Rechnung getragen wird. Das gilt insbesondere für

- Brandlastdichten,
- Wärmefreisetzungsraten oder Abbrandraten,
- Ausbeuten von Ruß und Schadstoffen.

Das Sicherheitskonzept muss sich an den in den europäischen Normen – unter übergeordneten Gesichtspunkten – bereits getroffenen Festlegungen orientieren und diese sinnvoll integrieren. Das betrifft einerseits die generellen Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit von Bauwerken und Tragwerken, die bauart- und baustoffübergreifend in DIN EN 1990 – Eurocode [10.24] geregelt sind. Weiterhin sind die mechanischen Einwirkungen auf Gebäude in den verschiedenen Teilen von DIN EN 1991-1 genormt.

Für den Brandfall wird in DIN EN 1991-1-2 (Eurocode 1 Teil 1-2) [10.1] empfohlen und auch vom zuständigen DIN-Arbeitsausschuss für Deutschland im Nationalen Anhang bestätigt, dass die Teilsicherheitsbeiwerte für die Materialkennwerte bei allen Baustoffen und Bauarten einheitlich $\gamma_M = 1,0$ betragen, d. h. dass mit den charakteristischen Werten gerechnet wird.

Damit kann die erforderliche Zuverlässigkeit der Brandschutzbemessung nur über die Definition einer hinreichend konservativen Bemessungsbrandeinwirkung sichergestellt werden. Das entspricht im Übrigen der bisherigen Praxis, die Brandeinwirkung über die für Brände im normalen Hochbau (Wohn- und Bürogebäude und Gebäude mit vergleichbarer Nutzung) repräsentative Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) und eine bauordnungsrechtlich geforderte, auf der sicheren Seite liegende Feuerwiderstandsdauer zu definieren.

Je nach verwendetem Naturbrandmodell und Nachweisverfahren sind unterschiedliche Eingangsgroößen für die Brandeinwirkungen maßgebend, die Streuungen und ggf. Modellunsicherheiten aufweisen und daher mit Teilsicherheitsbeiwerten zu beaufschlagen sind:

- die Brandbelastung, wenn die Branddauer für die Bemessung maßgebend ist (z. B. bei Bauteilen mit größerer Feuerwiderstandsdauer und bei Holzbauteilen mit konstanter Abbrandgeschwindigkeit (dieser Fall wird in Eurocode 1 Teil 1-2, Anhang E behandelt),
- die Brandausbreitungsgeschwindigkeit, wenn die Brandeinwirkung in der Frühphase des Brandes maßgebend wird (z. B. die Raumtemperatur bei ungeschützten Stahlbauteilen),
- die Brandfläche und/oder Abbrandrate, die in der stationären Phase eines *brandlastgesteuerten Brandes* die maximale Wärmefreisetzungsrates und Temperaturentwicklung bestimmen,
- die Ventilationsbedingungen, die im *ventilationsgesteuerten Brand* für die maximale Wärmefreisetzungsrates und Temperaturentwicklung ausschlaggebend sind.

10.4.2 Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers

Die erforderliche Zuverlässigkeit für die Bemessung der Konstruktion sowie für den Nachweis der Personensicherheit im Brandfall hängt von der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers in einer Nutzungseinheit eines Gebäudes und den damit verbundenen Schadensfolgen (Schäden an den Bauteilen bzw. Personen) ab.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} eines Schadenfeuers in einer brandschutztechnisch wirksam abgetrennten Nutzungseinheit mit der Grundfläche A in einem Bezugszeitraum von 1 Jahr kann mit Gl. (10.3) ermittelt werden:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_3 \quad (10.3)$$

mit

p_1 jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der Nutzungseinheit,

p_{21} Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Nutzer,

p_{22} Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr,

p_3 Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch eine automatische Löschanlage.

Die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 von mindestens einem Entstehungsbrand in der Nutzungseinheit kann alternativ nach Gl. (10.4) unter Annahme einer von der Grundfläche unabhängigen flächenbezogenen Brandentstehungsrates λ_1 oder nach Gl. (10.5) unter Berücksichtigung der (meist unterproportional) mit der Größe der Nutzungseinheit wachsenden Brandentstehungshäufigkeit bestimmt werden:

$$p_1 = 1 - \exp(-\lambda_1 \cdot A) \approx \lambda_1 \cdot A \quad (10.4)$$

$$p_1 = 1 - \exp(-a \cdot A^b) \approx a \cdot A^b \quad (10.5)$$

mit

- A Grundfläche der brandschutztechnisch abgetrennten Nutzungseinheit [m²],
- λ_1 mittlere Auftretensrate von Entstehungsbränden je Quadratmeter Grundfläche und Jahr [1/(m²·a)],
- a Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter und Jahr [1/(m²·a)],
- b Exponent, der von der Art der Nutzung und der Unterteilung der Nutzungseinheit (Raumzellen) abhängt.

Vereinfacht kann eine durchschnittliche jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 für eine typische Größe (d. h. durchschnittliche Grundfläche) des entsprechend genutzten Bereiches verwendet werden.

Zahlenwerte für λ_1 , a und b sowie p_1 können der Tabelle 10.3 entnommen werden. Die Angaben für verschiedene Nutzungen wurden in [10.23] aufgrund einer Auswertung verschiedener internationaler Quellen, insbesondere [10.25] und [10.26], zusammengetragen.

Tabelle 10.3 Mittlere jährliche Auftretensrate von Bränden λ_1 je Quadratmeter Geschossfläche bzw. Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 je Nutzungseinheit für verschiedene Nutzungen (nach [10.25], [10.26])

Nutzung	Mittlere Auftretensrate je m ² und Jahr	Auftretenswahrscheinlichkeit je Nutzungseinheit und Jahr		
		$p_1 = a \cdot A^b$		p_1
	λ_1 [1/(m ² ·a)]	a [1/(m ² ·a)]	b	[1/a]
Wohngebäude	4,7E-6	4,8E-5	0,9	3,0E-3
Bürogebäude	2,1E-6	5,9E-5	0,9	6,2E-3
Krankenhäuser, Pflegeheime	5,6E-6	7,0E-4	0,75	3,0E-1
öffentliche Versammlungsstätten private Versammlungsstätten	3,8E-6	9,7E-5	0,75 1,0	2,0E-2 1,2E-1
Schulen Bildungseinrichtungen	1,9E-6	2,0E-4	0,75	4,0E-2
Hotels, Beherbergungsstätten	-	8,0E-5	1,0	3,7E-2
Geschäftshäuser	4,7E-6	6,6E-5	1,0	8,4E-3
Industriegebäude (Produktion)	6,4E-6	1,7E-3	0,53	4,4E-2
Lagergebäude	1,4E-5	6,7E-4	0,5	1,3E-2

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_{21} berücksichtigt die Erstbekämpfung des Entstehungsbrandes durch die Nutzer, p_{22} gilt analog für die Löschmaßnahmen der alarmierten Feuerwehr. Aufgrund internationaler Erfahrungswerte und eigener statistischer Untersuchungen kann pauschal mit $p_2 = p_{21} \cdot p_{22} \approx 0,1$ gerechnet werden.

Nach englischen Brandstatistiken werden durchschnittlich 50 – 70 % der Entstehungsbrände durch die Nutzer gelöscht [10.30] (konservativ $p_{21} = 0,5$), sodass die Feuerwehr entweder gar nicht alarmiert wird oder lediglich noch Nachlöscharbeiten durchführen muss.

Der Erfolg der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr hängt einerseits von der Eingreifzeit und Leistungsfähigkeit der Feuerwehr und andererseits von der Brandausbreitung bis zum Beginn der Löscharbeiten ab. Bei öffentlichen Feuerwehren ist von einer durchschnittlichen Eingreifzeit von ca. 15 Minuten auszugehen. Bei einer Werk- oder Betriebsfeuerwehr ist die Eingreifzeit in der Regel deutlich kürzer als bei der öffentlichen Feuerwehr und ggf. die Stärke und Ausrüstung an das spezielle Objekt angepasst, sodass die Ausfallwahrscheinlichkeit p_{22} geringer anzusetzen ist.

Zahlenwerte für p_{22} für die Brandbekämpfung durch eine öffentliche Feuerwehr bzw. eine Werkfeuerwehr werden in Tabelle 10.4 vorgeschlagen. Zwischen den angegebenen Eingreifzeiten darf linear interpoliert werden. Da die Brandbekämpfungsmaßnahmen der Werkfeuerwehr und der öffentlichen Feuerwehr nicht voneinander unabhängig sind, darf jeweils nur eine Feuerwehr, d. h. diejenige mit der geringeren Ausfallwahrscheinlichkeit, in Gl. (10.3) berücksichtigt werden.

Tabelle 10.4 Ausfallwahrscheinlichkeiten p_{21} , p_{22} und p_3 der Brandbekämpfung¹

Brandbekämpfung durch	Ausfallwahrscheinlichkeit		
	p_{21}	p_{22}	p_3
Nutzer	0,5		
öffentliche Feuerwehr mit Eingreifzeit < 15 min > 20 min		0,2 0,5	
Werkfeuerwehr mit Eingreifzeit 1) < 10 min (vier Staffeln) < 10 min (zwei Staffeln)		0,02 0,05	
automatische Löschanlage Sprinkleranlage nach VdS/CEA-Standard 2) in anderen Fällen Sonstige Wasserlöschanlage Gaslöschanlage			0,02 0,05 0,1 0,1

¹⁾ automatische Brandmeldung und Alarmierung werden vorausgesetzt

²⁾ Planung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung nach den anerkannten Regeln der Technik

¹ Hinweis: In den technischen Baubestimmungen der Bundesländer werden für die anzunehmenden Ausfallwahrscheinlichkeiten teilweise abweichende Festlegungen getätigt.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_3 einer automatischen Löschanlage hängt vom Auslegungsstandard ab. Als VdS-Standard für flächendeckende Sprinkleranlagen gem. Tabelle 10.4. gelten Löschanlagen, bei denen für die Planung, den Einbau sowie den Betrieb der Löschanlage neben den geltenden Planungs- und Einbauregeln auch alle qualitätssichernden Maßnahmen gem. VdS CEA 4001 erfüllt werden. Dazu zählen insbesondere die Bauteil- und Errichteranerkennungen, die vom anerkannten Errichter und vom Betreiber durchzuführenden Instandhaltungsmaßnahmen und die jährliche Prüfung durch einen Prüfsachverständigen. Gleiches gilt für Gaslöschanlagen nach VdS-Standard gem. den VdS-Planungs- und Einbaurichtlinien für Gaslöschanlagen (VdS 2093, VdS 2380, VdS 2381).

Die Löschmaßnahmen der Feuerwehr und die Brandbekämpfung durch eine Löschanlage sind näherungsweise voneinander unabhängig, sodass sowohl p_{22} als auch p_3 in Gl. (10.3) eingesetzt werden dürfen. Dies gilt nicht, wenn auf Grund der vorliegenden Brandgefahr lediglich eine Kontrolle der Brandentwicklung durch die automatische Feuerlöschanlage im Brandfall zu erwarten ist und daher eine zusätzliche manuelle Brandbekämpfung durch die Feuerwehr notwendig wird. In diesem Fall sind der Ausfall der automatischen und der Ausfall der manuellen Brandbekämpfung nicht mehr unabhängig, sodass ohne genauere Analyse konservativ $p_{22} = 1,0$ anzunehmen ist. Eine vergleichbare Wechselwirkung besteht zwischen automatischen und nicht automatischen Brandmeldeanlagen und der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr. Kommt es in einem mit einer Brandanlage ausgestatteten Gebäude zu einem Brandereignis, ist davon auszugehen, dass die Feuerwehr zu einem früheren Zeitpunkt mit der Brandbekämpfung beginnen kann als ohne Brandmeldeanlage, damit die Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Löscheinsatz steigt und das zu betrachtende Brandszenario weniger intensiv ausfällt. Bei der Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Löscheinsatz handelt es sich aber wie bei der Wechselwirkung von Werkfeuerwehr und öffentlicher Feuerwehr um eine bedingte Wahrscheinlichkeit. Die für das Sicherheitskonzept anzugebene Ausfallwahrscheinlichkeit p_2 für die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr wäre in diesem Fall in Abhängigkeit des Vorhandenseins einer Brandmeldeanlage in der Form $p_{2|BMA}$ anzugeben. Exemplarische Untersuchungen zu den Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau wurden anhand eines Beispiels in [10.54] dokumentiert. Dabei wurde die positive Wirkung der BMA auf das Brandereignis näherungsweise über eine verkürzte Zeitdauer bis zum Beginn der Löscharbeiten modelliert. Es existieren jedoch kaum statistischen Daten, die in Gebäuden mit Brandmeldeanlagen belegen, wie groß der Zeitgewinn in der Zeitspanne vom Brandausbruch bis zur Brandbekämpfung gegenüber einem Gebäude ohne Brandmeldeanlage ausfällt (vgl. Kapitel 7, Unterkapitel 7.2.3). In den Untersuchungen wurden daher die Auswirkungen eines Zeitgewinns zwischen 3 und 7 Minuten untersucht. Weiterhin hat sich gezeigt, dass der Sicherheitsgewinn abhängig ist von der Art der Feuerwehr, dem jeweiligen Zeitpunkt des Löschangriffs und der Ausfallwahrscheinlichkeit der BMA ist. Es hat sich für das Beispiel gezeigt, dass ein zusätzlicher Faktor $p_{2|BMA}$ für die Ermittlung der erforderlichen Zuverlässigkeit im Brandfall zwischen $p_{2|BMA} = 0,15$ und $p_{2|BMA} = 0,75$ liegen kann, so dass beispielsweise ein Wert von $p_{2|BMA} = 0,5$ als hinreichend konservativ angesehen werden könnte. In jedem Fall wären vor einer Berücksichtigung der Brandmeldeanlage im Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung weitere Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Bauteiltypen erforderlich.

10.4.3 Erforderliche Zuverlässigkeit der Konstruktion im Brandfall

Im Informativen Anhang B von DIN EN 1990 [10.24] werden die verschiedenen baulichen Anlagen in Schadensfolgeklassen CC eingestuft, denen über Zuverlässigkeitsklassen RC ein erforderlicher Zuverlässigkeitsindex β bzw. eine Versagenswahrscheinlichkeit p_f zugeordnet wird. Diese gelten sowohl für die Gebrauchslastfälle als auch für außergewöhnliche Lastfälle wie Brand. In Tabelle 10.5 sind die Schadensfolgen sowie die Werte β und p_f für Grenzzustände der Tragfähigkeit und einen Bezugszeitraum von 1 Jahr zusammengestellt. Dabei gilt mit $\Phi(\cdot)$ als Funktion der Standard-Normalverteilung

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (10.6)$$

Tabelle 10.5 Einstufung baulicher Anlagen in Schadensfolgen und Zuordnung von Zuverlässigkeitsklassen nach DIN EN 1990 [10.24], Anhang B

Schadensfolgeklassen CC Zuverlässigkeitsklassen RC	Merkmale	Beispiele im Hochbau
CC3 RC3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen $\beta = 5,2$ $p_f = 1,0 \text{ E-}7 \text{ (1/a)}$	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC2 RC2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen $\beta = 4,7$ $p_f = 1,3 \text{ E-}6 \text{ (1/a)}$	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
CC1 RC1	Niedrige Folgen für Menschen und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen $\beta = 4,2$ $p_f = 1,3 \text{ E-}5 \text{ (1/a)}$	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr, (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

Aus der für alle Lastfälle geltenden Versagenswahrscheinlichkeit p_f und der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem Schadenfeuer in der betreffenden Nutzungseinheit nach Gl. (10.3) kann eine bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ im Brandfall bzw. der damit verknüpfte Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wie folgt bestimmt werden:

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \quad (10.7)$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) \quad (10.8)$$

Dabei ist Φ^{-1} die Umkehrfunktion der Standard-Normalverteilung.

Zur Einschätzung von möglichen wirtschaftlichen und umweltbeeinträchtigenden Schadensfolgen, die gemäß der Tabelle 10.5 die Basis für die Zuordnung von Zuverlässigkeitsklassen nach DIN EN 1990 bilden, ist im Brandfall in der Regel eine Einzelfallbetrachtung erforderlich.

Insbesondere bei Industriegebäuden ist eine pauschale Berücksichtigung der stark von den individuellen betrieblichen Prozessen und Wechselwirkungen der Unternehmenstätigkeiten abhängenden wirtschaftlichen Folgen nicht sachgerecht.

10.4.4 Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandschutzbemessung der Konstruktion

Für die Brandschutzbemessung von Bauteilen und Tragwerken ist in der Regel die Bauteiltemperatur die maßgebende Brandeinwirkung. Sie ergibt sich aufgrund der Brandraumtemperatur in der Umgebung der Bauteile, die ihrerseits von der Art, Menge und Verteilung der im Raum vorhandenen Brandlasten, den Ventilationsbedingungen, den Eigenschaften des Brandraumes und ggf. der Wirkung von anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen abhängt.

Für Brandlasten in unterschiedlich genutzten Gebäuden gibt es nur eine begrenzte Anzahl von Datenquellen. In DIN EN 1991-1-2, Anhang E [10.1] und im Nationalen Anhang DIN EN 1991-1-2/NA [10.35] sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Brandlastdichten (mittlere Brandlasten pro m² Geschossfläche) für typische Nutzungen angegeben. Darauf basierend wurden in [10.35] als charakteristische Werte die 90 %-Quantile empfohlen, die in Anlehnung an [10.1] unter der Voraussetzung einer Gumbel-Verteilung mit einem Variationskoeffizienten von 0,3 berechnet wurde (siehe Tabelle 10.6).

Die Brandlastdichten in Tabelle 10.6 gelten für Bereiche, die für die jeweilige Nutzung typisch sind. Besondere Räume sind gesondert zu betrachten. Brandlasten aufgrund der Gebäudekonstruktion (Tragelemente, Bekleidungen und Beschichtungen) sind ebenfalls getrennt zu ermitteln und zu den Werten aus Tabelle 10.6 zu addieren.

Zur Ermittlung des Zeitverlaufs der Raumtemperatur mit einem Naturbrandmodell wird unter Vorgabe eines Bemessungsbrandszenarios ein resultierender Verlauf der Wärmefreisetzungsrates ermittelt, der einen großen Teil der Einflussgrößen beinhaltet. Auch für die Wärmefreisetzungsrates sind in DIN EN 1991-1-2/NA [10.35] charakteristische Werte für die o. g. typischen Nutzungen angegeben, auf deren Wiedergabe hier verzichtet wird.

Tabelle 10.6 Brandlastdichten [MJ/m²] für verschiedene Nutzungen (in Anlehnung an [10.1])

Nutzung	Mittelwert	Standardabweichung	90 %-Quantil
Wohnen	780	234	1085
Krankenhaus (Zimmer)	230	69	320
Hotel (Zimmer)	310	93	431
Bücherei, Bibliothek	1500	450	2087
Büro	420	126	584
Schule (Klassenzimmer)	285	85,5	397
Einkaufszentrum	600	180	835
Theater (Kino)	300	90	417
Verkehr (öffentl. Bereich)	100	30	139

Fortsetzung Tabelle 10.6

Nutzung	Mittelwert	Standardabweichung	90 %-Quantil
Industrie – Lager	1180	*)	2240
Industrie – Produktion	300	*)	590

*) Die Brandlastdichten in Industriegebäuden streuen stark. Die angegebenen Werte dienen nur als Anhalt, sie können eine genauere Ermittlung in der Regel nicht ersetzen.

In [10.23] wurden umfangreiche Zuverlässigkeitsanalysen für Einzelbauteile aus unterschiedlichen Baustoffen (Beton, Stahl und Holz) in unterschiedlich genutzten Gebäuden (Wohn-/Bürogebäude, Verkaufsstätte/Versammlungsstätte, Industriebau) durchgeführt. Zum Vergleich wurde die Zuverlässigkeit derselben Bauteile bei Normbrandbeanspruchung nach ETK berechnet, wobei die bauaufsichtlich geforderte Feuerwiderstandsdauer deterministisch vorgegeben wurde. Es hat sich in allen Fällen ergeben, dass während des gesamten Brandverlaufes die Zuverlässigkeit bei realistischer Naturbrandbeanspruchung unter Berücksichtigung streuender Einflussgrößen höher liegt als bei Normbrandbeanspruchung am Ende der geforderten Feuerwiderstandsdauer.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass bei den Beton- und Stahlbauteilen die Brandlastdichte aufgrund ihrer großen Streuungen maßgebenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit hat. Bei den Holzbauteilen gilt das für die Abbrandrate von Holz. Die nächstwichtigere Rolle spielt die maximale Wärmefreisetzungsrates in der Phase des vollentwickelten Brandes.

Es wird davon ausgegangen, dass für diese maßgebenden Einflussgrößen der Brandeinwirkung jeweils 90 %-Quantile als charakteristische Werte definiert werden. Für die Bemessung werden Bemessungswerte eingesetzt, die sich aus den charakteristischen Werten durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_{fi} errechnen. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden so festgelegt, dass die erforderliche Zuverlässigkeit nach Tabelle 10.5 im Mittel eingehalten und gemäß [10.23] um höchstens $\pm\Delta\beta_{fi} = 0,5$ unter- oder überschritten wird.

Sowohl für die Brandlastdichte als auch für die Wärmefreisetzungsrates wird in der Regel eine Gumbel-Verteilung vorausgesetzt. Dann können die Teilsicherheitsbeiwerte mit Gl. (10.9) als Quotient aus dem Bemessungswert im Brandfall und dem charakteristischem Wert berechnet werden:

$$\gamma_{fi} = \frac{1 - V \cdot \sqrt{6} / \pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(\Phi(\alpha \cdot \beta_{fi})))]}{1 - V \cdot \sqrt{6} / \pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(0,9))]} \quad (10.9)$$

Dabei ist $\Phi(\)$ die Funktion der Standard-Normalverteilung.

Sofern die Brandlastdichte pauschal für eine Nutzung aus Tabelle 10.6 entnommen wird, werden der Variationskoeffizient zu $V = 0,3$ und der Sensitivitätsfaktor für die Ermittlung des Bemessungswertes zu $\alpha = 0,6$ angenommen. Wird die Brandlastdichte im Einzelfall ermittelt (wie z. B. im Industriebau üblich), sind die zufälligen Streuungen kleiner. Dann kann der Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} mit dem Variationskoeffizienten $V = 0,2$ und dem Sensitivitätsfaktor $\alpha = 0,5$ berechnet werden.

Für die flächenspezifische Wärmefreisetzungsrates bei unterschiedlichen Nutzungen liegen weltweit kaum statistische Daten vor. Die Streuungen dürften aber geringer sein als bei den

Brandlastdichten. Analog zu der im Einzelfall ermittelten Brandlastdichte werden der Variationskoeffizient zu $V = 0,2$ und der Sensitivitätsfaktor zu $\alpha = 0,5$ angenommen.

Die mit diesen Annahmen ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte γ_{fi} für die Brandlastdichte q und die Wärmefreisetzungsrate ($HRR \equiv \dot{Q}$) können in Abhängigkeit vom erforderlichen Zuverlässigkeitsindex β_{fi} aus Bild 10.2 (aus [10.35]) abgelesen werden.

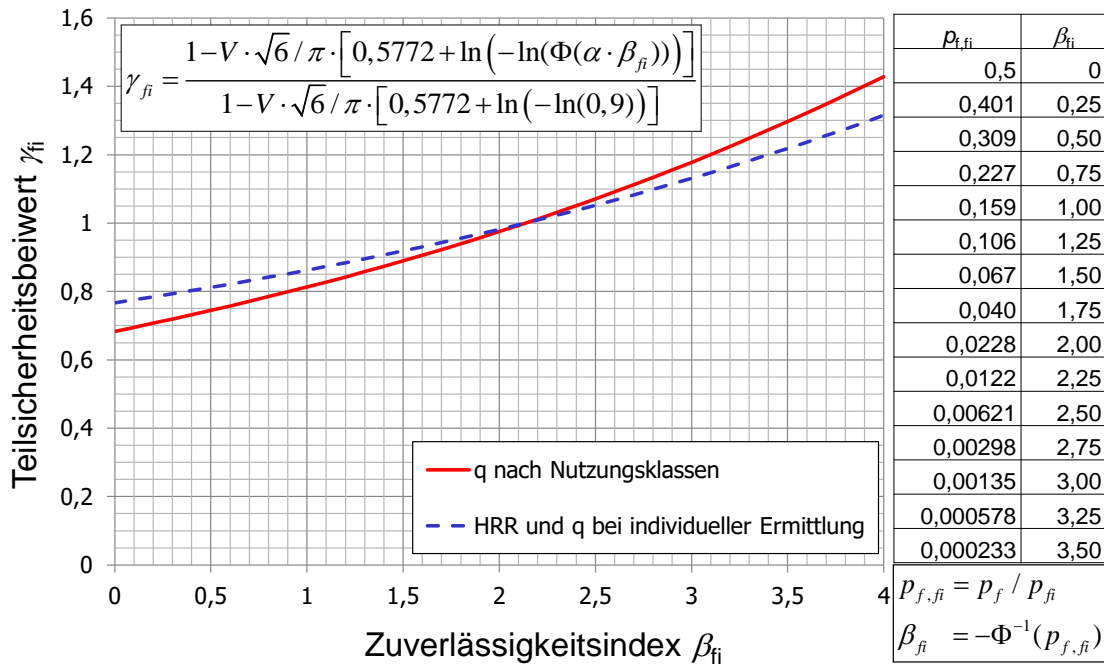


Bild 10.2 Teilsicherheitsbeiwerte für die Einflussgrößen eines Naturbrandes bezogen auf die definierten charakteristischen Werte (90 %-Quantil); durchgezogene Linie: Brandlastdichte für Nutzungen nach Tabelle 10.6; gestrichelte Linie: Wärmefreisetzungsrate sowie Brandlastdichte bei genauer Ermittlung im Einzelfall

10.4.5 Berücksichtigung unterschiedlicher Brandszenarien

Bei Vorhandensein einer automatischen Löschanlage oder einer besonders schlagkräftigen Feuerwehr ist ein Schadenfeuer (Vollbrand) nur mit einer deutlich geringeren Auftretenswahrscheinlichkeit zu erwarten als ohne diese Maßnahmen. Wenn die besonderen Brandbekämpfungsmaßnahmen wirksam werden, löschen oder kontrollieren sie den Brand, sodass er für die brandschutztechnische Bemessung der Konstruktion keine Rolle mehr spielt.

Anders verhält es sich, wenn der Brand durch anlagentechnische Maßnahmen wie die Rauch- und Wärmeableitung zwar beeinflusst wird, aber trotzdem noch für die Konstruktion kritische Temperaturen erreicht. Solche Szenarien können in der in Kapitel 10.3.2 beschriebenen Ereignisbaumanalyse berücksichtigt werden.

Ein Ereignisbaum, der neben den Maßnahmen zur Brandmeldung und Brandbekämpfung auch Maßnahmen zur Rauch- und Wärmeableitung (RWA) enthält, ist in Bild 10.3 dargestellt. Den einzelnen Ereignispfaden des Ereignisbaums lassen sich verschiedene Brandverläufe a bis f entsprechend Bild 10.4 zuzuordnen, die durch den zeitlichen Verlauf der Wärmefreiset-

zungsraten beschrieben werden. Diese Brandverläufe werden in den Grenzzustandsgleichungen für den Nachweis der Bauteile berücksichtigt, die im Rahmen einer Systemzuverlässigkeitsanalyse miteinander verknüpft werden.

Die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall $p_{f,fi}$ des Systems ist über die Branddauer veränderlich: mit Zunahme der Brandeinwirkung erhöht sich zum einen die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Grenzzustand (z. B. eine Versagenstemperatur) erreicht oder überschritten wird, zum anderen erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit, dass Löschmaßnahmen beginnen und wirksam werden. Wegen dieses gegenläufigen Prozesses muss die probabilistische Systemzuverlässigkeitsanalyse in der Regel im Zeitschrittverfahren durchgeführt werden. Sie ist daher sehr aufwendig und für praktische Anwendungen wenig geeignet. In [10.23] wurden solche Analysen durchgeführt, um Sicherheitsanforderungen für vereinfachte, praxismgerechte Nachweise abzuleiten bzw. zu kalibrieren.

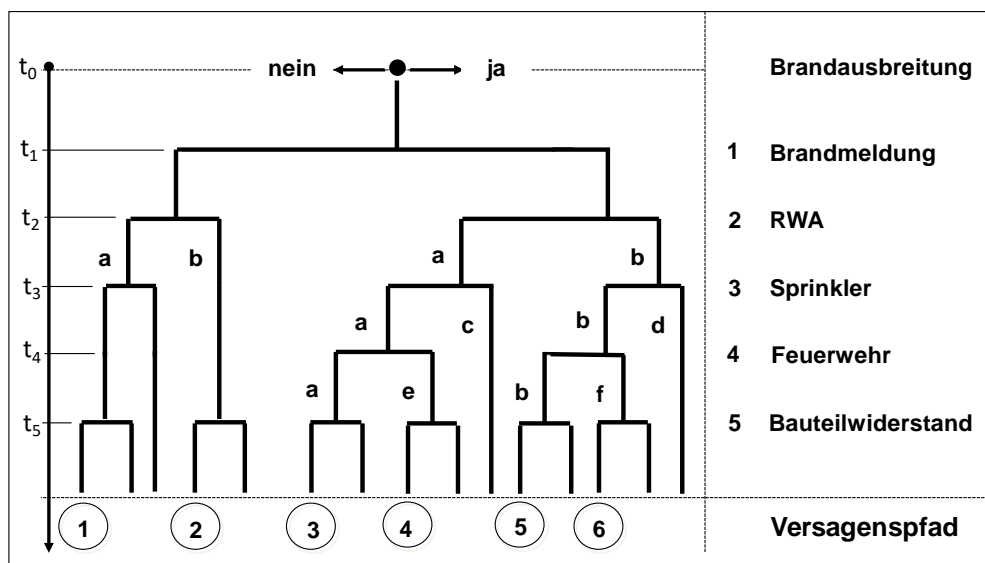


Bild 10.3 Ereignisbaum zur Ermittlung möglicher Versagenspfade (nach [10.3])

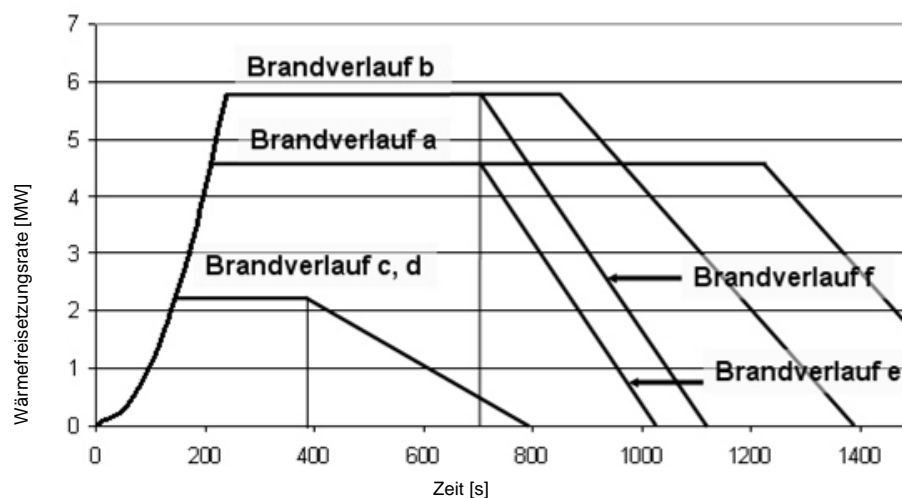


Bild 10.4 Brandverläufe (qualitativ) in Abhängigkeit von Funktion und Ausfall der anlagentechnischen und abwehrenden Komponenten

10.5 Sicherheitskonzept für Nachweise der Räumung im Brandfall

10.5.1 Grundlagen für leistungsorientierte Nachweise

Ein quantitatives Sicherheitskonzept für Nachweise der Personensicherheit analog zum Sicherheitskonzept für den konstruktiven Brandschutz (siehe Kapitel 10.2), dass die vorhandenen Unsicherheiten im Nachweis quantifiziert, berücksichtigt und für gleichbleibendes Sicherheitsniveau sorgt, liegt noch nicht vor bzw. muss noch entwickelt werden. In der Praxis werden derzeit die Randbedingungen für die Anwendung der Verfahren zwischen den Planern und der Genehmigungsbehörde bzw. dem Prüfeningenieur festgelegt. Es ergeben sich so Einzelfalllösungen, die nicht ohne Weiteres auf andere Gebäude übertragen werden können. Dabei muss durch die Beteiligten sichergestellt werden, dass die Planung mindestens das allgemein akzeptierte Sicherheitsniveau erfüllt. Durch strukturierte und objektive Ableitung maßgebender Brandszenarien und der dazugehörigen Bemessungsbrände, wie in der DIN 18009 [10.51] beschrieben, kann ein gewisses Maß an Standardisierung sowie eine Nachvollziehbarkeit für Dritte gewährleistet werden. Ein Beispiel für eine weitergehende Standardisierung ist in der Schweizer VKF-Brandschutzrichtlinie 27-15 "*Nachweisverfahren im Brandschutz*" zu finden [10.53]. Diese ist in der Schweiz bei der Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden verbindlich anzuwenden. Neben grundlegenden Anforderungen an Nachweisverfahren, vergleichbar zur DIN 18009-1, ist durch Vorgabe des Leistungskriteriums der raucharmen Schicht zusammen mit dem Anhaltswert für den Extinktionskoeffizienten von 0.2 m^{-1} in Kombination mit einem stark rauchenden Brandgut sichergestellt, dass bei der Führung entsprechender Nachweise ein gleichbleibendes Sicherheitsniveau erzielt wird.

Das Sicherheitsniveau in Bezug auf die Personensicherheit von nach präskriptiven Vorgaben geplanten Gebäuden oder von auf Grundlage von Ingenieurmethoden nachgewiesenen Gebäuden, ist unbekannt und nicht ohne weiteres quantifizierbar.

Im Folgenden werden der Status-quo und die notwendigen Arbeiten für die Herleitung eines entsprechenden Sicherheitskonzeptes beschrieben. Dabei sollte auf die Vorarbeiten des vorhandenen Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnischen Nachweise für Bauteile und Tragwerke nach den Eurocodes zurückgegriffen werden.

Derzeitiger internationaler Stand der Technik bei den Nachweisen zur Personensicherheit im Brandfall ist es, die verfügbare Räumungszeit $t_{\text{verfügbar}}$ (engl.: ASET – Available Safe Egress Time) mit der für die Räumung benötigten Zeit $t_{\text{Räumung}}$ (engl.: RSET – Required Safe Egress Time) zu vergleichen. Der Nachweis ist erbracht, wenn $t_{\text{verfügbar}}$ größer wird als $t_{\text{Räumung}}$ [10.28]

$$t_{\text{verfügbar}} > t_{\text{Räumung}} \quad (10.10)$$

Zumeist wird noch ein empirischer Sicherheitsfaktor gewählt, um die vorhandenen Unsicherheiten der Nachweisgrößen zu kompensieren. Mit einem globalen Sicherheitsfaktor κ lautet Gl. (10.10) dann wie folgt:

$$t_{\text{verfügbar}} / t_{\text{Räumung}} \geq \kappa \quad (10.11)$$

Zwar ist das Sicherheitsniveau so nicht quantifizierbar, durch die Wahl der Eingangsgrößen und der Grenzwerte für die Leistungskriterien auf der sicheren Seite liegend wird aber im Regelfall eine hinreichende Sicherheit gewährleistet. Der Dokumentation und der Prüfung der entsprechenden Nachweise kommen hierbei eine hohe Bedeutung zu.

Die Nachweisgrößen $t_{\text{verfügbar}}$ und $t_{\text{Räumung}}$ werden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Leistungskriterien (z. B. Höhe der raucharmen Schicht, Erkennungsweite, FED, siehe Kapitel 10.5.3) aus Brand- bzw. Räumungssimulationen verschiedener Komplexität und Genauigkeit gewonnen.

Die sehr einfache Gleichung (10.11) beschreibt ein komplexes Problem, welches zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse und einem einheitlichen Sicherheitsniveau eines strukturierten Ansatzes bedarf. In den folgenden Abschnitten wird eine mögliche Herangehensweise dargestellt.

10.5.2 Brand- und Räumungssimulation

Im Brandschutzingenieurwesen existieren diverse Modelle, mit denen die Verläufe und Wirkungen von Bränden simuliert werden können (vgl. Kapitel 5). Mit diesen Modellen ist der Planer in Abhängigkeit der Leistungskriterien in der Lage, die verfügbare Fluchtzeit $t_{\text{verfügbar}}$ zu berechnen. Der Auswahl des richtigen Modells für die betrachtete Fragestellung (vgl. Kapitel 5) sowie der Erfahrung in der Anwendung kommt eine hohe Bedeutung zu.

Für die Simulation der Räumung stehen Modelle unterschiedlicher Genauigkeit und Komplexität zur Verfügung (vgl. Kapitel 9). Neben der Zeitdauer der reinen Fluchtbewegung, die mit den o. g. Modellen berechnet werden kann, sind noch weitere Zeitspannen von der Alarmierung bis zum Beginn der Flucht, die sog. Reaktionszeit (en: pre-movement time), zu berücksichtigen (Bild 10.5). Die Ansätze für die Reaktionszeit sind dabei meist approximativ und basieren auf Auswertungen von Räumungsübungen. Bekannt ist vor allem das Modell nach Purser (vgl. Kapitel 9, [9.1]).

Da diverse numerische Modelle für die Brand- und Räumungssimulation existieren, können sich hier unter Umständen Probleme mit der Anwendbarkeit und der Anerkennung der Ergebnisse ergeben. In einer normativen Umsetzung der Nachweise zur Personensicherheit sollten dennoch keine Modelle festgeschrieben werden, weil dies den erreichten Stand der Technik einfrieren und keinen Raum lassen würde, neuere Erkenntnisse der Forschung einzubeziehen. Vielmehr sollte analog zu [10.36] ein Katalog mit Validierungsbeispielen vorgegeben werden, um die Eignung der Modelle und Programme für den jeweiligen Einsatzbereich überprüfen zu können. Entsprechende Vorschläge werden z. B. in [10.37] gemacht.

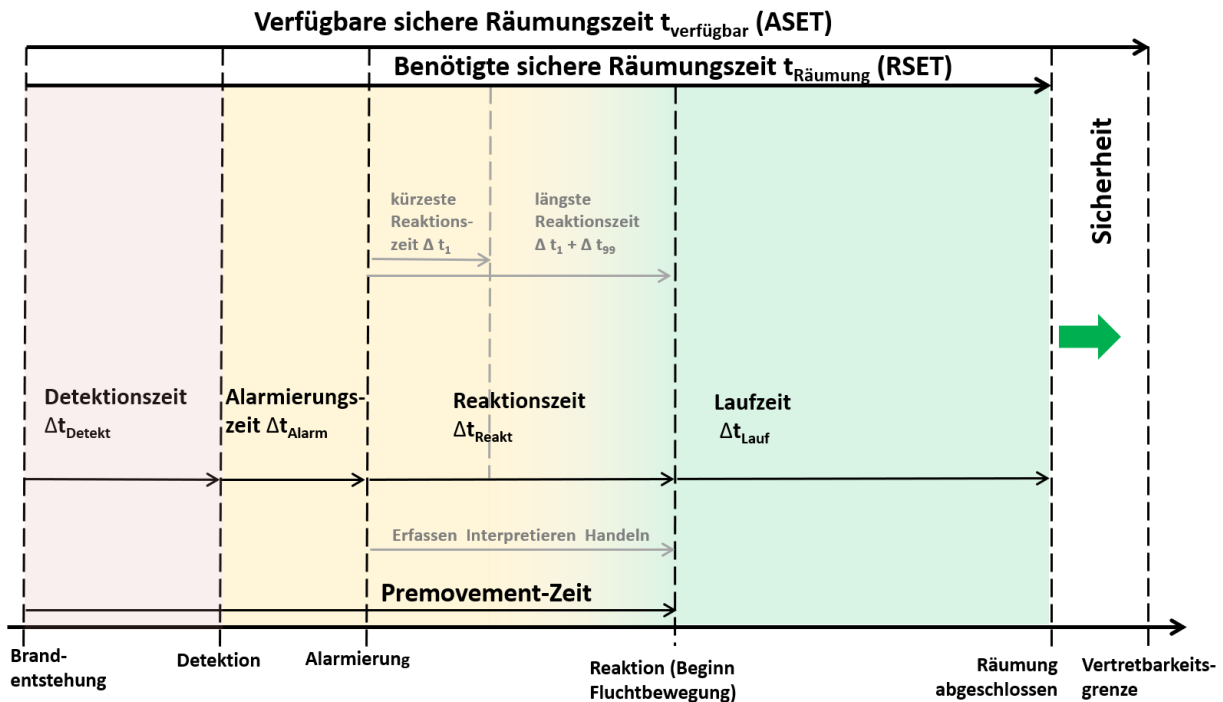


Bild 10.5 Schematische Darstellung der verschiedenen Zeitspannen bei der Räumung im Brandfall

10.5.3 Leistungskriterien

Nach Auswahl der Modelle für die Brand- und Räumungssimulation müssen die zugehörigen Leistungskriterien festgelegt werden, nach denen die Zeiten für $t_{\text{verfügbar}}$ und $t_{\text{Räumung}}$ aus den Simulationsergebnissen abgeleitet werden können. Für die Räumungssimulation ist dies meist recht einfach: $t_{\text{Räumung}}$ ist die Zeitspanne, bis der Fluchvorgang beendet ist, d. h. bis die letzte Person aus dem gefährdeten Bereich einen sicheren Bereich erreicht hat.

Etwas komplexer ist das Verfahren für die Festlegung von $t_{\text{verfügbar}}$, da die Leistungskriterien implizit zu unterschiedlichen Sicherheitsniveaus führen. Zur Vereinfachung seien diese in zwei Kategorien zusammengefasst:

- *Behinderung der Flucht.* Die Flucht kann behindert werden, indem Personen aufgrund zu geringer Sicht langsamer werden oder aufgrund zu hoher Rauchdichte die Fluchtrichtung ändern. Als Leistungskriterien werden z. B. die Höhe der raucharmen Schicht, die Erkennungsweite oder die optische Rauchdichte mit entsprechenden Beurteilungswerten angesetzt (siehe hierzu Kapitel 8).
- *Verhinderung der Flucht.* Die hier gewählten Kriterien implizieren eine größere Gefahr für die Personen, die bei Erreichen der Grenzwerte fluchtunfähig werden und nicht mehr in der Lage sind, sich selbst zu retten. Hierzu sind in der Literatur [10.30] entweder Beurteilungswerte oder Dosismodelle (FED, Fractional Effective Dose) zu finden (auch hierzu siehe Kapitel 8).

Je nachdem, welche Leistungskriterien gewählt werden, ergeben sich selbst bei dem gleichen Szenario und Bemessungsbrand mit den gleichen Modellen unter Umständen verschiedene

Zeiten für $t_{\text{verfügbar}}$, sodass der Nachweis nach Gl. (10.11) gegebenenfalls nur unter Berücksichtigung der Leistungskriterien für die Kategorie „Verhinderung der Flucht“ und nicht für die Leistungskriterien der Kategorie „Behinderung der Flucht“ geführt werden kann. Solange noch kein Sicherheitskonzept für Nachweise der Personensicherheit vorliegt, sollten für entsprechende Nachweise aufgrund der implizit enthaltenen Sicherheit Leistungskriterien der „Behinderung der Flucht“ angewandt werden.

Weiterhin spielt neben den unterschiedlichen Sicherheitsniveaus der verschiedenen Leistungskriterien gerade bei den CFD-Modellen, die in jeder Zelle die entsprechenden Auswertekriterien erfassen, auch noch der Ort der Auswertung eine große Rolle. Lokale Rauchgaskonzentrationen können z. B. das Leistungskriterium optische Dichte oder FED früher oder später anschlagen lassen, während sich die Personen ohne wesentliche Beeinträchtigung an anderer Stelle durch den Raum bewegen können. Da die heutigen Räumungsmodelle in der Regel nicht direkt mit den Modellen zur Berechnung der Brandwirkungen gekoppelt sind, können diese auch nicht auf entsprechende lokale Effekte reagieren. Die Ermittlung von $t_{\text{verfügbar}}$ und dementsprechend die Nachweisführung auf Grundlage des Ortes im Nachweisbereich, der zuerst die Leistungskriterien nicht mehr erfüllt, gewährleistet einen Nachweis auf der sicheren Seite. Aktuelle Forschungsarbeiten in diesem Bereich finden sich z.B. in [10.52].

10.5.4 Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände

Bei der individuellen Herleitung der für die Nachweisführung maßgeblichen Brandszenarien bzw. der Bemessungsbrände sowie der Festlegung der Leistungskriterien können sich erhebliche Unterschiede ergeben. Es ist daher wichtig, die maßgebende Brandszenarien zu identifizieren und Bemessungsbrände festzulegen. Bezogen auf die Personensicherheit sind tendenziell Brandszenarien zu entwickeln, die eine direkte oder indirekte Auswirkung auf den Fluchtweg aufweisen und entsprechend daraus Bemessungsbrände abzuleiten. Eine standardisierte Vorgehensweise auf Grundlage eines Sicherheitskonzeptes sollte daher mindestens entsprechende qualitative Vorgaben machen.

Grundsätze und Regeln für die Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden sind in der DIN 18009 [10.51] geregelt. Die Auswahl relevanter Szenarien und deren Konkretisierung (worst-credible) wird hier anhand der Auftretenswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes durchgeführt.

Einen weiteren Ansatz für die Festlegung von Bemessungsbrandszenarien bietet die US-amerikanische Richtlinie NFPA 101 „Life Safety Code“ [10.37], die neben präskriptiven Anforderungen auch einen leistungsorientierten Nachweis vorsieht. Hierfür werden acht verschiedene Szenarien vorgegeben, die in Tabelle 10.7 zusammengestellt sind.

Tabelle 10.7 Bemessungsbrandszenarien in Anlehnung an NFPA 101 [10.39]

Szenario	Beschreibung
1	Typisches nutzungsabhängiges Szenario (Standardfall)
2	Sich sehr schnell entwickelndes Feuer im Hauptrettungsweg (Reduktion der Anzahl der Rettungswege)
3	Entzündung in einem ungenutzten Raum neben dem Raum mit hoher Personenanzahl (unentdeckte Brandentstehung)
4	Entzündung in einem ungenutzten Raum ohne Detektion oder Sprinkler neben dem Raum mit hoher Personenanzahl (Ausfall der Brandschutzbarrieren)
5	Langsam entwickelndes, von den Brandschutzbarrieren abgeschirmtes Feuer in der Nähe von hochfrequentierten Räumen (Niederenergetischer Brand)
6	Feuer mit größtmöglicher Brandlast einer bestimmungsgemäßen Benutzung (Großes Feuer bei normaler Nutzung)
7	Brandeintritt von außen, das sich in den betreffenden Abschnitt hinein entwickelt (Brandweiterleitung)
8	Standardbrand unter Berücksichtigung des Ausfalls von aktiven und passiven Brandschutzsystem (Worst Case Szenario)

Sollte eines der Brandszenarien nicht relevant bzw. nicht möglich sein, so muss dies begründet werden. Des Weiteren können bzw. müssen noch zusätzliche Szenarien unter Berücksichtigung der charakteristischen Merkmale der baulichen Anlage und der Schutzziele nachgewiesen werden, wenn diese im Einzelfall relevant werden. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass die wichtigsten Fälle abgedeckt sind. Den einzelnen Szenarien weist Fleischmann [10.38] die Leistungskriterien in Abhängigkeit ihres Risikobeitrages zu. So muss für das Worst Case Szenario 8 das FED-Kriterium erfüllt werden, während für den Standardfall Szenario 1 z. B. die Erkennungsweite angewendet wird. Aus den festgelegten Brandszenarien werden in einem weiteren Schritt die Bemessungsbrände abgeleitet.

Für die Bemessungsbrände, die in der Regel als Zeitverlauf der Wärmefreisetzungsrate (HRR(t)) in den Simulationsmodellen vorgegeben werden, stellt der Life Safety Code keine konkreten Forderungen [10.37]. Auch bezüglich der maximalen Wärmefreisetzungsrate, der Brandlast und weiterer Parameter werden keine Angaben gemacht. Zur Gewährleistung vergleichbarer Nachweise wird es für sinnvoll gehalten, wenn in einem ganzheitlichen Sicherheitskonzept für die Nachweise der Personensicherheit die Brandszenarien in Abhängigkeit der Nutzungsart, Größe und/oder weiterer Parameter vollständig definiert und dokumentiert werden. Fleischmann [10.38] stellt dazu verschiedene Szenarien auf Basis des t^2 -Brandes dar und definiert die zugehörigen Parameter wie Heizwerte, Brandentwicklungsgeschwindigkeiten, Schadgasentstehungsraten.

Mit Veröffentlichung der DIN 18009-1 [10.51] steht in Deutschland eine Norm zur Verfügung, die für die Konkretisierung von Schutzziele, funktionalen Anforderungen Leistungskriterien für den Nachweis mit Hilfe von Brandschutzingenieurmethoden konkrete Anforderungen festlegt. Grundsätze sind die Identifizierung von Brandgefahren und die Abschätzung der resultierenden Risiken, welche als objektive Grundlage für die Auswahl bemessungsrelevanter Brand- und Räumungsszenarien herangezogen werden können.

Neben der Ableitung maßgebender Szenarien sind Angaben zu geeigneten Modellen und Grundsätze zur Festlegung von Sicherheitsbeiwerten und -zuschlägen aufgeführt.

10.5.5 Probabilistische Quantifizierung des Sicherheitsniveaus

Die vorgenannten Festlegungen zu den Simulationsmodellen sind nur der erste Schritt in Richtung eines ganzheitlichen Ansatzes für die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für Nachweise der Personensicherheit im Brandfall. Es wurden zwar die maßgeblichen Einflussgrößen, Modelle und Leistungskriterien benannt, es sind aber noch keine quantitativen Analysen erfolgt, die einerseits das gegenwärtige Sicherheitsniveau aufzeigen bzw. andererseits nachweisen, dass durch die leistungsorientierten Nachweise das erforderliche Sicherheitsniveau erreicht wird.

Im Gegensatz zu den Nachweisen für Bauteile und Tragwerke im Brandfall sind für Nachweise der Personensicherheit im Brandfall keine Zielversagenswahrscheinlichkeiten geregelt. Wie beschrieben, ist dies aufgrund der mit den Leistungskriterien verbundenen unterschiedlichen Sicherheitsniveaus (vgl. Kapitel 10.5.3) problematisch.

In diesem Fall können analog zur GruSiBau [10.39] bzw. zu EN 1990 [10.24] leistungskriteriumsbezogene Zielversagenswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden, indem repräsentative Gebäude bzw. maßgebliche Gebäudeteile, die dem geltenden Bauordnungsrecht genügen, hinsichtlich ihrer Versagenswahrscheinlichkeiten bezogen auf das jeweilige Leistungskriterium und das maßgebliche Szenario untersucht werden. Eine Einordnung in Risikoklassen könnte z. B. analog zu [10.35] nach Gebäudeklasse und Nutzung erfolgen. Aus einer hinreichend großen Anzahl an Vergleichsrechnungen könnten dann repräsentative Zielversagenswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden (vgl. Kapitel 10.5.9).

Generell kann Gl. (10.10) auch als probabilistischer Grenzzustand interpretiert werden, wobei sowohl $t_{\text{verfügbar}}$ als auch $t_{\text{Räumung}}$ Streuungen und Unsicherheiten aufweisen. Der Versagensbereich der Grenzzustandsfunktion Z ist dann definiert als

$$Z(\mathbf{x}) = t_{\text{verfügbar}} - t_{\text{Räumung}} \leq 0 \quad (10.12)$$

Es ist die Gesamtheit der Wertekombinationen, mit denen Gl. (10.12) kleiner gleich Null ergibt, \mathbf{x} ist hierbei ein Vektor der mit einer Unsicherheit behafteten Parameter. Wenn $t_{\text{verfügbar}}$ und $t_{\text{Räumung}}$ mit ihren stochastischen Parametern Mittelwert μ und Standardabweichung σ bekannt sind und als normalverteilt angenommen werden können, kann die bedingte Wahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ einer nicht erfolgreichen Räumung im Falle eines gefährlichen Brandes mit Gl. (10.13) berechnet werden:

$$p_{f,fi} = \Phi \left[\frac{-(\mu_{t_{\text{verfügbar}}} - \mu_{t_{\text{Räumung}}})}{\sqrt{\sigma_{t_{\text{verfügbar}}}^2 + \sigma_{t_{\text{Räumung}}}^2}} \right] = \Phi(-\beta_{fi}) \quad (10.13)$$

Dabei sind μ der Mittelwert und σ die Standardabweichung der stochastischen Variablen $t_{\text{verfügbar}}$ und $t_{\text{Räumung}}$. Dabei ist $\Phi()$ die Funktion Standardnormalverteilung und β_{fi} ist der Zuverlässigkeitsindex im Brandfall.

In der Regel sind jedoch weder die Verteilungsparameter von $t_{\text{verfügbar}}$ und $t_{\text{Räumung}}$ a priori bekannt, noch folgen sie unbedingt einer Normalverteilung. In diesem Fall muss die Versagens-

wahrscheinlichkeit mit wesentlich aufwändigeren Verfahren wie der First Order Reliability Method (FORM) für analytische Grenzzustände oder der (optimierten) Monte Carlo Methode für simulationsbasierte Ansätze berechnet werden. Diese Verfahren benötigen selbst ein großes Maß an Rechenzeit, weswegen sie derzeit nicht ohne weiteres mit ebenfalls rechenintensiven Modellen der Brandsimulation gekoppelt werden können. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Im Folgenden wird daher die Vorgehensweise exemplarisch anhand von zwei Beispielen erläutert.

10.5.6 Beispiel für probabilistische Nachrechnungen mit einfachen Modellen

Beispielhaft soll für das Standardszenario gemäß Tabelle 10.7 die Wahrscheinlichkeit einer nicht erfolgreichen Räumung mittels einfacher Modelle für eine 200 m² große und 4 m hohe Versammlungsstätte mit einer Bar berechnet werden. Die verwendeten Modelle – das Zonenmodell [10.41] und das Räumungsmodell [10.33] – entsprechen dem typischen Nachweisfall mit einfachen Ingenieurmethoden. In einem ersten Schritt wurden die notwendigen Parameter identifiziert und mit stochastischen Modellen auf Basis von Literaturangaben beschrieben (Tabelle 10.8) (siehe auch [10.43]).

Aufgrund nur begrenzt vorhandenen Quellen mit Angaben über die Streuung maßgeblicher Parameter wurden auf der sicheren Seite liegend alle Parameter als normalverteilt mit konservativen Mittelwerten und Standardabweichungen angenommen, sodass auch das Ergebnis als auf der sicheren Seite liegend vermutet werden kann.

Tabelle 10.8 Stochastische Parameter für den Nachweis mit einfachen Modellen.

Parameter	Mittelwert	Standardabweichung
Max. Wärmefreisetzungsrate	2000 kW	500 kW
Brandentwicklungsdauer bis 1 MW	300 s	80 s
Personendichte pro m ² am Anfang	2,0 P/m ²	0,5 P/m ²
Benutzte Fläche pro Person im Strom	0,1 m ²	0,0125 m ²
Reaktionszeit	60 s	15 s

Als Leistungskriterium zur Bestimmung von $t_{\text{verfügbar}}$ wurde das erste Unterschreiten einer raucharmen Schichthöhe von 2,5 m angesetzt (Kategorie Behinderung der Flucht). Als Berechnungsverfahren wurde das optimierte Monte Carlo Verfahren „Adaptive Importance Sampling“ (AIS) nach [10.43] benutzt. Für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wurden rund 1200 Simulationen benötigt. Die Analysen ergaben eine Versagenswahrscheinlichkeit unter der Bedingung, dass ein gefährlicher Brand eingetreten ist, von $p_{f,fi} = 6,28 \cdot 10^{-2}$, was einem Zuverlässigkeitsindex $\beta_{fi} = 1,5$ entspricht.

Die Sensitivitätsanalysen zeigten, dass die Brandentwicklungsdauer mit 77 % und die Reaktionszeit mit 22 % den größten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit haben und zusammen 99 % zur resultierenden Varianz beitragen (Bild 10.6).

Wenn sich diese Tendenz in zukünftigen Berechnungen bestätigen sollte, erscheint es sinnvoll, für einfache Nachweise die erforderliche Zuverlässigkeit durch geeignet gewählte charakteristische Werte für die Brandentwicklungsdauer und die Reaktionszeit sicherzustellen.

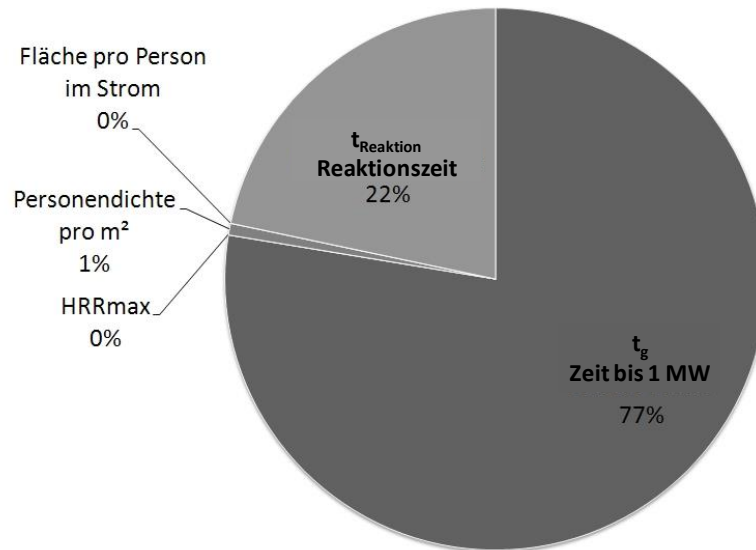


Bild 10.6 Sensitivitäten für die Zuverlässigkeitsberechnung mit einer Rauchschichthöhe von 2,5 m als Leistungskriterium (die Brandentwicklungsdauer bis zum Erreichen von 1 MW ist der klar dominierende Parameter)

Für die Herleitung einer maximal zulässigen Zielversagenswahrscheinlichkeit $p_{f,\text{Ziel}}$, die der errechneten Versagenswahrscheinlichkeit p_f gegenüber gestellt werden muss, wird analog zum Sicherheitskonzept für die Bemessung der Bauteile vorgegangen. Diese ist abhängig von der Wahl des Leistungskriteriums. Da bei der Verwendung eines Leistungskriteriums wie der raucharmen Schicht mit einer Höhe von 2,5 m anders als z. B. bei dem Leistungskriterium FED, bei einer Unterschreitung des Leistungskriteriums nicht unmittelbar mit einem Personenschaden gerechnet werden muss, besteht die Möglichkeit sich an der Zielzuverlässigkeit für Nachweise für Bauteile für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu orientieren. Diese Zielversagenswahrscheinlichkeit liegt damit bei $p_{f,\text{Ziel}} = 1 \times 10^{-5}$ ($\beta = 2,9$).

Da die Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ unter der Bedingung gilt, dass ein gefährlicher Brand aufgetreten ist, kann zusätzlich die (geringe) Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem Brand in der Nutzungseinheit berücksichtigt werden. Analog zum Sicherheitskonzept für Bauteile gemäß Kapitel 10.4 und [10.35] wird dabei ein Bezugszeitraum von einem Jahr zu Grunde gelegt. Für das untersuchte Beispiel wird nach Tabelle 10.3 (letzte Spalte) eine pauschale jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit $p_1 = 0,02$ gewählt.

Als Maßnahme zur Verhinderung einer Brandausbreitung kann die manuelle Brandbekämpfung durch die Nutzer mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit $p_{21} = 0,5$ nach Tabelle 10.4 berücksichtigt werden, da sich ein durch die Nutzer bekämpfter Brand in der Regel nicht mehr zu einem gefährlichen Brand entwickelt. Die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr beginnt in der Regel erst nach Abschluss der Selbstrettung, sodass die Ausfallwahrscheinlichkeit der Löschmaßnahmen der Feuerwehr hier nicht relevant ist und mit $p_{22} = 1,0$ angenommen wird. Unter der Voraussetzung, dass das Auftreten des Brandes, die manuelle Bekämpfung des Brandes durch die Nutzer und das Unterschreiten der raucharmen Schichthöhe voneinander unabhängig sind, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass es bei einem Brand zu einer Unterschreitung des Grenzwertes für die raucharme Schicht von 2,5 m kommt, bevor die letzte Person den Raum verlassen hat, zu

$$p_f = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_{f,fi} = 0,02 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 0,0628 = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ 1/a} \quad (10.14)$$

Der zugehörige Zuverlässigkeitsindex beträgt $\beta = 3,22$ und liegt damit über dem nach [10.24] für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken angestrebten Wert $\beta = 2,9$. Die im vorliegenden Beispiel mit konservativen Annahmen für die Eingangsgrößen ermittelte bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall ($p_{f,fi} = 6,28 \cdot 10^{-2}$ bzw. $\beta_{fi} = 1,5$) ist offensichtlich ausreichend, weil bei Unterschreitung der raucharmen Schichthöhe von 2,5 m zwar die Flucht behindert, aber nicht verhindert wird. Es liegt also keine direkte Gefährdung von Personen vor.

Um die Konservativität des gewählten Leistungskriteriums (raucharme Schicht mit einer Höhe von 2,5 m) zu verdeutlichen, wurde die Zuverlässigkeitsbewertung nochmals mit identischen Modellen und Eingangswerten wiederholt, allerdings wurde diesmal mit einem weniger konservativen Leistungskriterium einer raucharmen Schichthöhe von 1,8 m gerechnet. Mit diesem ergibt sich eine um den Faktor 25 geringere bedingte Wahrscheinlichkeit $p_{f,fi} = 0,26 \%$, dass bei einem Brand die raucharme Schichthöhe von 1,8 m unterschritten wird, bevor alle Personen den Raum verlassen haben:

$$p_f = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_{f,fi} = 0,02 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 0,0026 = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ 1/a} \quad (10.15)$$

Das entspricht einem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 4,0$, der schon fast im Bereich der nach [10.24] bzw. [10.35] für Grenzzustände der Tragfähigkeit anzustrebenden Zuverlässigkeit ($\beta = 4,7$) liegt.

10.5.7 Einfluss von Brandschutzsystemen am Beispiel einer BMA

Um den Einfluss von Brandschutzsystemen auch bei Nachweisen der Personensicherheit quantifizieren zu können, können diese analog zum Standsicherheitsnachweis im Brandfall unter Berücksichtigung ihrer Ausfallwahrscheinlichkeit in die Systembewertung mit einbezogen werden. Beispielhaft soll hier der Einfluss einer Brandmeldeanlage (BMA) mit gebäudeinterner Alarmierung betrachtet werden. Diese wirkt sich zwar nicht wie eine Sprinkleranlage direkt auf den Brandverlauf aus, kann aber durch die frühe Detektion des Brandes und anschließende Alarmierung zu einer signifikanten Verkürzung der Reaktionszeit beitragen, wie dies bereits in Pusers Modell [9.1] ansatzweise vorgesehen ist.

Um die Vergleichbarkeit zu erhalten, wird das vorherige Beispiel unverändert übernommen, allerdings wird für die Reaktionszeit bei funktionierender BMA mit Alarmierung nun eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 45 s bei gleichbleibender Standardabweichung (15 s) angesetzt. Die Berechnung der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit für das Leistungskriterium Rauchschichthöhe von 2,5 m bei einem Brand und einer funktionierenden BMA mit Alarmierungskette ergibt $p_{f,fi,BMA} = 1,96 \cdot 10^{-2}$.

Allerdings kann die BMA mit Alarmierungskette bei Anforderung versagen. In Kapitel 7 wird bezugnehmend auf Untersuchungen von normenkonformen Brandmeldeanlagen, die durch zertifizierte Dienstleister errichtet und regelmäßig gewartet werden, eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $p_{f,BMA} = 0,00092$ angegeben. Vor dem Hintergrund, dass nicht alle im Einsatz befindlichen Brandmeldeanlagen gemäß den anerkannten Regeln der Technik geplant, errichtet, betrieben und instandgehalten werden, wird empfohlen, für zukünftige Sicherheitskonzepte den auf der sicheren Seite liegenden Wert von $p_{f,BMA} = 0,05$ anzunehmen. Versagt die Branderkennung oder die Alarmierung, so kommt es zu dem bereits oben berechneten Szenario mit

der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi} = 6,28 \cdot 10^{-2}$. Die Zusammenhänge sind in Bild 10.7 als System (nach Albrecht [10.27]) dargestellt.

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems ergibt sich mathematisch vereinfacht zu

$$p_f = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot [p_{f,BMA} \cdot p_{f,fi} + (1 - p_{f,BMA}) \cdot p_{f,fi,BMA}] \quad (10.16)$$

Die jährliche Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Brand die raucharme Schicht von 2,5 m unterschritten wird, bevor alle Personen den Raum verlassen haben, errechnet sich bei Vorhandensein einer BMA mit Alarmierung mit der Ausfallwahrscheinlichkeit $p_{f,BMA} = 0,05$ zu $p_f = 2,18 \cdot 10^{-4}$, was einem Zuverlässigkeitsindex $\beta \approx 3,5$ entspricht. Bei Vorhandensein einer BMA mit Alarmierungskette reduziert sich also die Versagenswahrscheinlichkeit der Personenrettung in diesem Fall um den Faktor 2,9.

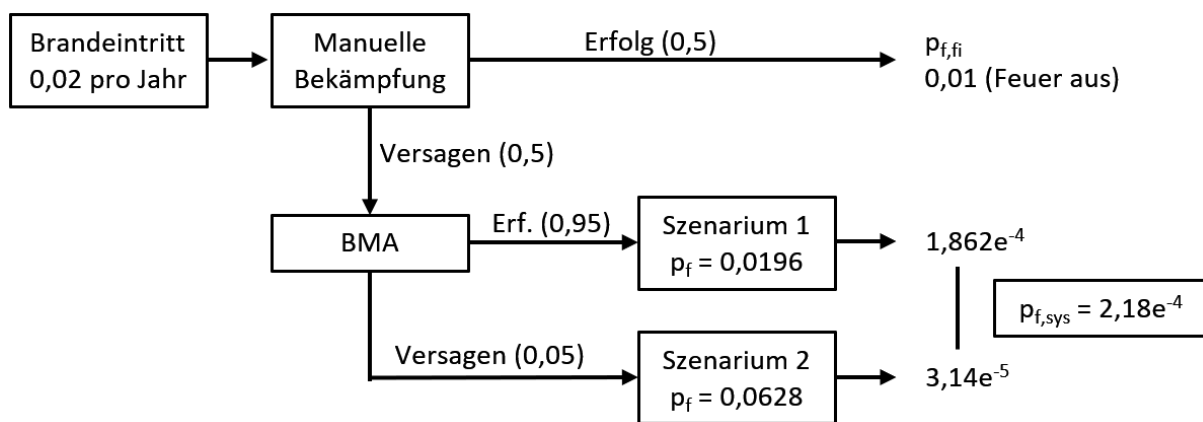


Bild 10.7 Darstellung des Systems Brandschutz bei Berücksichtigung einer BMA mit Alarmierungskette (Näherungslösung durch Multiplizieren und Addieren der Komponenten) (nach [10.27])

Unter Berücksichtigung der gleichen erforderlichen Versagenswahrscheinlichkeit kann ein Vergleich des untersuchten Systems mit einer Brandmeldeanlage mit anderen Systemen unter Berücksichtigung der jeweiligen Kosten eine Nutzen-Kosten-optimierte Lösung ohne Einbußen im (erforderlichen) Sicherheitsniveau bringen. Der hier dargestellte Fall stellt wiederum nur eine beispielhafte Anwendung dar. Um den Einfluss von anlagentechnischen Maßnahmen auf die Zuverlässigkeit der Personenrettung im Brandfall allgemeingültig bewerten zu können, sind weitergehende Systemanalysen mit statistisch belegten Ausfallwahrscheinlichkeiten der Gesamtheit der technischen Systeme durchzuführen (vgl. Kapitel 7.2.4, 7.3.4, 7.4.4).

10.5.8 Beispiel für probabilistische Nachrechnungen mit komplexen Modellen

Aufwendiger ist die probabilistische Berechnung unter Zuhilfenahme von komplexen Rechenmodellen (z. B. numerische Modelle der Strömungs- und Räumungssimulation), da diese meist signifikant längere Rechenzeiten benötigen. Hierfür wurde in [10.45] ein Antwortflächenverfahren entwickelt, mit welchem solche probabilistische Analysen unter bestimmten Randbedingungen mit wenigen Rechenläufen möglich sind.

Für die Analysen wurde das oben gezeigte Beispiel übernommen und als Leistungskriterium der FED-Wert gewählt, der bei Simulationsrechnungen mit der Software FDS [10.46] in der Nähe der Ausgänge aus dem Brandraum ermittelt wurde. Die Bereiche in der Nähe der Ausgänge aus dem Brandraum stellen den Bemessungsfall dar, weil dort die meisten Brandtoten

bei Fluchtversuchen gefunden werden [10.47] und da sich hier meist auch Staus bilden können. Als Bemessungsszenario wurde der sich quadratisch entwickelnde Brand im Bereich der Bar angenommen. Die verfügbare Zeit $t_{\text{verfügbar}}$ stellt den Zeitraum von Brandbeginn bis zu dem Zeitpunkt dar, an dem an einem der Ausgänge aus dem Brandraum infolge des Bemessungsbrandes ein FED-Wert von 0,3 erreicht wird.

Für die Räumung wurde vereinfachend eine Kapazitätsanalyse gewählt. Eine Verlangsamung der Personen durch Rauch wurde vernachlässigt, weil der Stau vor den Türen ohnehin eine Verlangsamung bewirkt. Die stochastischen Modelle, deren Parameter vereinfachend als normalverteilt angenommen wurden, sind in Tabelle 10.9 dargestellt.

Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass im Brandfall an einer der Türen ein FED-Wert von 0,3 erreicht oder überschritten wird, bevor alle Personen den Brandraum verlassen haben, berechnet sich nun zu $p_{f,fi} = 9,22 \cdot 10^{-7}$. Dieser Wert für das Leistungskriterium „Verhinderung der Flucht“ bei einem FED-Wert $\geq 0,3$ liegt erwartungsgemäß weit unter der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit für Leistungskriterium „Behinderung der Flucht“ bei einer raucharmen Schichthöhe $\leq 2,5$ m. Die Versagenswahrscheinlichkeit der Personenrettung im Brandfall bezogen auf einen Referenzzeitraum von einem Jahr ergibt sich analog zum Beispiel in Kapitel 10.5.6 zu $p_f = 9,22 \cdot 10^{-9}$, was einem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 5,6$ entspricht und damit etwas höher ist, als der Wert der Zielzuverlässigkeit für Grenzzustände der Tragfähigkeit ($\beta = 5,2$ für hohe Schadensfolgen CC3) der hier als Vergleichswert herangezogen wird. Wird anstelle des Leistungskriteriums des FED-Wertes (Verhinderung der Flucht) das Leistungskriterium der Einhaltung einer raucharmen Schichthöhe von 2,5 m (Leistungskriterium Behinderung der Flucht) gewählt, ist mit größeren Versagenswahrscheinlichkeiten zu rechnen. Auf der anderen Seite wird sich dann als Wert für die Zielzuverlässigkeit am Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit orientiert ($\beta = 2,9$).

Das ist ein Hinweis darauf, dass der praxisübliche Nachweis der Personensicherheit unter Verwendung des Leistungskriteriums Behinderung der Flucht deutlich auf der sicheren Seite liegende Verhältnisse für die Personenrettung gewährleistet.

Tabelle 10.9 Stochastische Parameter für den Nachweis mit komplexen Modellen.

Parameter	Mittelwert	Standardabweichung
Max. Wärmefreisetzung	2500 kW	250 kW
Brandentwicklungsdauer bis 1 MW	300 s	50 s
Kohlenmonoxid Yield	0,1 g/g	0,02 g/g
Reaktionszeit	60 s	12 s
Gehgeschwindigkeit	1,2 m/s	0,12 m/s
Anzahl Personen im Raum bei t=0	300 Pers	30
Kapazität der Türen	1,39 Pers/m/s	0,139 Pers/m/s

Eine Analyse der Sensitivitäten, wie in Bild 10.8 dargestellt, zeigt, dass die maßgebenden Einflussgrößen hier die Brandentwicklungsdauer (67 %) und die Anzahl der Personen (16 %)

sind. Die Türkapazität (8 %), die CO-Konzentration (5 %) und die Reaktionszeit (4 %) spielen in diesem Fall nur eine geringe Rolle.

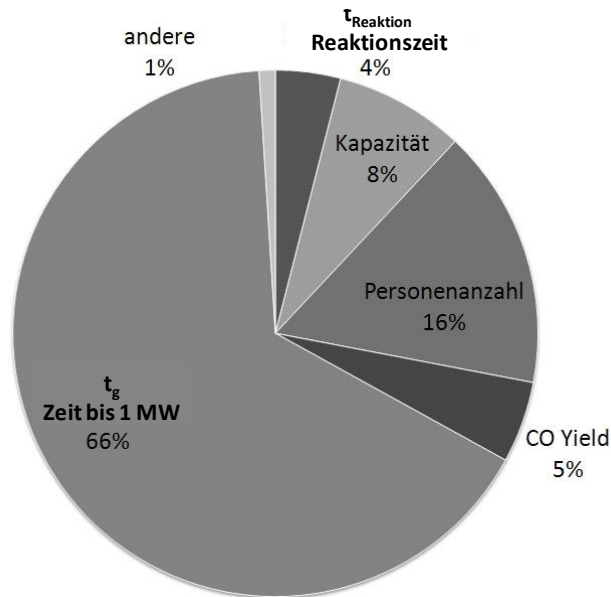


Bild 10.8 Sensitivitäten für die Berechnung der Zuverlässigkeit mit dem FED-Wert als Leistungskriterium.

Für Parameter mit einer großen Sensitivität muss bei der späteren Festlegung eines geeigneten Sicherheitsformates zusätzlich zu einem geeignet gewählten charakteristischen Wert, ein Teilsicherheitsbeiwert festgelegt werden. Für Parameter mit mittlerem Einfluss kann der charakteristische Wert ausreichend sein.

Es zeichnet sich ab, dass für entsprechende Nachweise der Personensicherheit vor allem für die Brandentwicklungsdauer ein zusätzlicher Teilsicherheitsbeiwert benötigt wird, wie im Grundsatz bereits in [10.48] empfohlen wurde. Die übrigen Einflussgrößen könnten mit konservativ gewählten charakteristischen Werten (Nennwerten) ohne weitere Sicherheitselemente eingesetzt werden.

Auch bei diesem Nachweis können Brandschutzsysteme mit ihrer jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeit in die Analysen mit einbezogen und hinsichtlich ihrer Effektivität analog zu Kapitel 10.5.7 quantifiziert werden. Ein Beispiel dazu findet sich in [10.45].

Auf Grundlage der Zuverlässigkeitsanalyse nach Kapitel 10.5.6 könnte auch ein Sicherheitskonzept mit einem globalem Sicherheitsfaktor κ gemäß Gl. (10.11) so kalibriert werden, dass eine angestrebte Zielversagenswahrscheinlichkeit für das jeweilige Leistungskriterium mit einer gewissen Toleranz eingehalten wird.

10.5.9 Leistungskriterien und Zuverlässigkeitsanforderungen

Abhängig von der Art des Leistungskriteriums müssen vergleichbare Nachweiskriterien geschaffen werden, die folgende Angaben beinhalten:

- das Leistungskriterium selbst,
- den zulässigen Grenzwert,
- den Ort bzw. das Verfahren, wie der Wert aufgenommen wird,

- den Zeitraum der Betrachtung und
- die zulässige Wahrscheinlichkeit.

Ein ausformuliertes probabilistisches Leistungskriterium könnte zum Beispiel lauten:

„Eine optische Dichte von 0,1 1/m gemessen in 2,5 m Höhe am Ausgang aus dem nachzuweisenden Raum ($t_{\text{verfügbar}}$) darf bei einem Brand während der benötigten Räumungszeit, also der Zeit bis die letzte Person den Ausgang passiert hat ($t_{\text{Räumung}}$), nur mit einer maximal zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ unterschritten werden.“

Bei Nachweisen mit dem Leistungskriterium der raucharmen Schichthöhe, die nur eine **Behinderung** der Flucht beschreiben, kommt als maximal zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit $p_f = 1,9 \cdot 10^{-3}$ [1/a] in Betracht, entsprechend dem in DIN EN 1990 [10.24], Anhang C für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit bei mittleren Konsequenzen empfohlenen Zuverlässigkeitsindex $\beta = 2,9$. Lässt man eine Bandbreite von $\Delta\beta = \pm 0,5$ für geringere oder größere Konsequenzen zu, sollte die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit p_f zwischen $\max p_f = 8,2 \cdot 10^{-3}$ und $\min p_f = 3,4 \cdot 10^{-4}$ [1/a] liegen.

Wird der Nachweis dagegen mit dem Leistungskriterium FED-Wert geführt, der die **Verhinderung** der Flucht betrachtet, sollte die angestrebte Zielversagenswahrscheinlichkeit in der gleichen Größenordnung gewählt werden, wie bei Nachweisen der Tragfähigkeit. Dies bedeutet bei mittleren Schadensfolgen $p_f = 1,3 \cdot 10^{-6}$ [1/a], entsprechend $\beta = 4,7$ mit einer Bandbreite von $\Delta\beta = \pm 0,5$ für geringere oder größere Konsequenzen (z. B. geringere oder höhere Anzahl betroffener Personen) zwischen $\max p_f = 1,3 \cdot 10^{-5}$ und $\min p_f = 1,0 \cdot 10^{-7}$ [1/a].

Konkrete Festlegungen zu den Leistungskriterien und Zielversagenswahrscheinlichkeiten müssen im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben erarbeitet und anhand von Vergleichsrechnungen mit den oben beschriebenen Zuverlässigkeitsmethoden für verschiedene Gebäude, die den geltenden präskriptiven Vorschriften und Normen genügen, getroffen werden. Anschließend kann ein geeignetes Sicherheitsformat – mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_i für einzelne Parameter mit besonders großem Einfluss auf die Zuverlässigkeit oder mit einem globalen Sicherheitsfaktor κ für die erforderliche Räumungszeit – entwickelt und mit Hilfe von Zuverlässigkeitsnachweisen für eine repräsentative Auswahl von Gebäuden kalibriert werden.

Auch in leistungsorientierten Konzepten müssen einige Elemente präskriptiv festgelegt werden. Beispiele hierfür sind, die Szenarien und Leistungskriterien, um die Vergleichbarkeit und Prüfbarkeit zu gewährleisten. Für den Ansatz von anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen müssen ebenfalls Festlegungen getroffen werden. Beispielsweise kann nur eine nach Norm entworfene, abgenommene und gewartete Sprinkleranlage die hohe Verfügbarkeit und Wirkung entfalten, die im Sicherheitskonzept vorausgesetzt wurden.

Daneben gibt es auch elementare Anforderungen, die nicht durch leistungsorientierte Ansätze ersetzt werden können, z. B. die Forderung nach zwei unabhängigen Rettungswegen ab einer bestimmten Raumgröße oder Personenzahl. Diese Elemente sind zu identifizieren, abzustimmen und festzulegen.

10.6 Nachweis wirksamer Löscharbeiten

In den letzten Jahren ist auch das bauaufsichtliche Schutzziel „wirksame Löscharbeiten“ in den Fokus gerückt und hat in der Praxis zu kontroversen Diskussionen geführt. Ausgelöst wurden diese durch ein Positionspapier der Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU [10.49]. Darin wird klargestellt, dass das Schutzziel „Rettung von Personen“ bei Standardgebäuden allein dadurch erreicht wird, dass die materiellen Anforderungen an die Gestaltung und Dimensionierung der Rettungswege gemäß Landesbauordnung eingehalten werden. Besondere Maßnahmen für die Rauchableitung im Brandfall sind dann für dieses Schutzziel nicht zu fordern. Hingegen können Entrauchungsmaßnahmen notwendig sein, um eine ausreichende Sicht für die Einsatzkräfte der Feuerwehr sicherzustellen und auf diese Weise die Durchführung wirksamer Löscharbeiten zu ermöglichen. In diesem Sinne wurden von der Fachkommission Bauaufsicht die verschiedenen Sonderbauvorschriften (Verkaufs- und Versammlungsstättenverordnung, Industriebaurichtlinie) überprüft und überarbeitet.

Unstrittig und qualitativ nachvollziehbar ist, dass die Feuerwehr im Brandfall bei ausreichenden Sichtverhältnissen den Brandherd schneller finden und das Feuer wirksamer bekämpfen kann. Es bleibt aber offen, in welchem Umfang die Rauchableitung zum Erfolg der Löscharbeiten beiträgt, also die Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung gemäß Kapitel 10.4.2 beeinflusst.

Um diesen Einfluss quantitativ bewerten zu können, wird ein Modell für die Wirksamkeit von Löscharbeiten der Feuerwehr benötigt, wie es in vereinfachter Form in Kapitel 7.6.1.4 des Leitfadens beschrieben ist. Dem Modell liegt folgende Grenzzustandsgleichung zugrunde, in der die mit der Branddauer anwachsende Brandfläche A_F mit einer maximal beherrschbaren Brandfläche $A_{F,max}$ verglichen wird:

$$Z = A_{F,max} - A_F(t_{act}) = A_{F,max} - \pi \cdot (v_{aus} \cdot t_{act})^2 \quad (10.17)$$

Zur Ermittlung der sich einstellenden Brandfläche A_F wird der international akzeptierte Ansatz für die Wärmefreisetzungsrate in der Brandentwicklungsphase ($\alpha \cdot t^2$ Ansatz) umgeformt, indem dem Kennwert für die Brandentwicklung α ein Zahlenwert für die Brandentwicklungsgeschwindigkeit v_{aus} zugeordnet wird. In Beispielrechnungen wurde die Brandentwicklungsgeschwindigkeit wie folgt angenommen:

$v_{aus} = 0,4$ m/min für eine mittlere Brandentwicklung

$v_{aus} = 1,0$ m/min für eine schnelle Brandausbreitung.

Angaben über die von der Feuerwehr beherrschbaren Brandflächen $A_{F,max}$ sind in der Literatur kaum zu finden. Lediglich in Bezug auf erdgeschossige Industriebauten finden sich in [7.16] eindeutige Kenngrößen. Ersatzweise wurden in Kapitel 7.6.2 Versagenswahrscheinlichkeiten p_{22} für die Löscharbeiten der Feuerwehr in Abhängigkeit von der Eingreifzeit für zwei verschiedene beherrschbare Brandflächen $A_{F,max} = 200$ m² bzw. 400 m² in Parameterrechnungen ermittelt und mit Erfahrungswerten aus der Einsatzpraxis verglichen.

Die Größe $A_{F,max}$ bietet theoretisch die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit der Feuerwehr, z. B. nach Anzahl von Einsatzkräften und/oder Strahlrohren, eine bessere Löschwasserversorgung, ein übersichtlicheres Gebäude oder bessere Sichtverhältnisse durch Rauchableitung zu berücksichtigen:

$$A_{F,max} = f(\text{Feuerwehr, Löschwasser, Gebäude, Rauchableitung}) \quad (10.18)$$

Um auf diesem Wege zu belastbaren Aussagen zu kommen, werden jedoch statistische Daten benötigt, die nur durch eine bundeseinheitliche Brandstatistik bereitgestellt werden können. Hier gibt es in Deutschland bekanntlich große Defizite, sodass mit kurzfristigen Ergebnissen nicht gerechnet werden kann. Seit der letzten Auflage dieses Leitfadens waren in dieser Hinsicht keine wesentlichen Veränderungen zu verzeichnen. Allerdings hat der Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz der deutschen Feuerwehren (FA VB/G) 2017 einen Evaluierungsbogen zu Maßnahmen des Vorbeugenden Brand- und Gefahrenschutzes veröffentlicht [10.50], der als Grundlage für eine einheitliche Datenerhebung genutzt werden kann. Sofern sich die Anwendung des Evaluierungsbogens bei den deutschen Feuerwehren durchsetzt, kann bis zu einer weiteren Auflage dieses Leitfadens mit einer belastbaren Datenbasis gerechnet werden, die weitergehende Untersuchungen und ggf. auch die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für das Schutzziel „wirksame Löscharbeiten“ analog zu den oben beschriebenen Konzepten für die Schutzziele „konstruktiver Brandschutz“ und „Räumung im Brandfall“ zulässt.

10.7 Literatur

- [10.1] DIN EN 1991-1-2:2010-12, Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke; Teil1-2: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [10.2] *RANTANTALO, T.; DOBBERNACK, R.*: State of the Art of Fire Risk Analysis; 10. Internationales Brandschutz-Symposium des vfdb, Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Kurzreferate, Herausgeber D. Hosser; 6. und 7. Juni 2005, Hannover, 2005.
- [10.3] *DEHNE, M.*: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung; Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, September 2003.
- [10.4] *NELSON, H. E.; SHIBE, A. J.*: A System for Fire Safety Evaluation of Health Care Facilities; NBSIR 78-1555, NIST, Washington DC, 1980.
- [10.5] *WATTS, J. M.*: Fire Risk Indexing. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering; section five, chapter 10, 3rd edition, 2002.
- [10.6] XPS FIRE, manual Version 3.0, Munich Re, 9/96.
- [10.7] *BUDNICK, E. K.; MCKENNA, L. A. Jr., WATTS, J. M. Jr.*: Quantifying Fire Risk for Telecommunications Network Integrity; in: Fire Safety Science – Proceedings of the Fifth International Symposium, International Association for Fire Safety Science, pp. 691 – 700, 1997.
- [10.8] *FONTANA, M.*: SIA 81 – A Swiss Risk Assessment Method; in: VTT Symposium 179, Institute of Structural Engineering, ETH, Zurich, Switzerland, pp 59-69.
- [10.9] *DE SMET*: F.R.A.M.E: Fire Risk Assessment Method for Engineering; http://www.framemethod.net/index_5.html.
- [10.10] *LARSSON, D.*: Developing the Structure of a Fire Risk Index Method for Timber-frame Multi-storey Apartment Buildings; Report 5062, Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, 2000.
- [10.11] *HULTQUIST, H., KARLSSON, B.*: Evaluation of a Fire Risk Index Method for Multi Storey Apartment Buildings; Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, Report 3088, Lund, 2000.
- [10.12] *KARLSSON, B.*: Fire Risk Index Method-Multi Storey Apartment Buildings, FRIM-MAB, Version 1.2, Trätekt Report I 0009025, Sweden, 2000.
- [10.13] *WATTS, J. M. Jr.*: Fire Risk Ranking; Section 5, Chapter 2, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, USA, 1995.
- [10.14] *FRANTZICH, H.*: Fire Safety Risk Analysis of a Hotel; Department of Fire Engineering, Lund University, Report 3091, Sweden, 1997.
- [10.15] *LINSTONE; TUROFF*: The Delphi Method – Techniques and Applications; Addison-Wesley Publishing Company, 1975.
- [10.16] *NYSTEDT, F.; RANTANTALO, T.; MICHEELSEN, Ch.*: Quantifying the Safety Level in the Danish Building Fire Regulations, National Agency for Enterprise and Construction, Copenhagen, 2000.

- [10.17] ISO/TC92/SC4/WG10 N24 Rev: Draft Material submitted describing Fire Risk Assessment Methods, 2001.
- [10.18] *MEACHAM, B. J.*: The SFPE Handbook, Fire Protection Engineering; section five, chapter 12, 3rd edition, 2002.
- [10.19] ISO/TC/SC4/WG10 N34 Rev1: Fire Safety Engineering, WG10: Fire Risk Assessment; Draft document on fire risk Assessment guidance, 09/2001.
- [10.20] *RANTANTALO, T.; NYSTEDT, F.*: Use of Fire Safety Engineering and Risk Analysis in Cultural Heritage Buildings; Fire Risk Evaluation To European Cultural Heritage (FIRE TECH), European study into the Fire Risk to European Cultural Heritage, WG6, Fire Risk Assessment Methods, Example of Application (Appendix 4), 2005.
- [10.21] *MAGNUSSON, S. E.; FRANTZICH, H.; HARADA, K.*: Fire Safety Design Based on Calculations, Uncertainty Analysis and Safety Verification; Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Report 3078, Sweden, 1995.
- [10.22] *HOSSER, D.; SPREY, W.*: A Probabilistic Method for Optimisation of Fire Safety in Nuclear Power Plants; in: First International Symposium on Fire Safety Science, Gaithersburg, Maryland, USA, 1985.
- [10.23] *HOSSER, D.; WEILERT, A.; KLINZMANN, C.; SCHNETGÖKE, R.; ALBRECHT, C.*: Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung). Abschlussbericht zum DIBt-Vorhaben ZP 52-5-4.168-1239/07; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, November 2008.
- [10.24] DIN EN 1990: 2010-12, Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung.
- [10.25] *RAHIKAINEN, J.; KESKI-RAHKONEN, O.*: Statistical Determination of Ignition Frequency of Structural Fires in Different Premises in Finland; Fire Technology 40, 2004, pp 335-353.
- [10.26] BSI, PD 7974-1:2003: Application of fire engineering principles to the design of buildings; Part 1: Initiation and development of fire within the enclosure of origin. MBO Musterbauordnung, IS-Argebau, Fassung November 2002 zuletzt geändert am Februar 2019.
- [10.27] *ALBRECHT, C.*: Grundlagen und Sicherheitskonzept für den Nachweis der Räumung im Brandfall. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2011, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 214, 2011, S. 83-100.
- [10.28] *TUBBS, J. S.; MEACHAM, B. J.*: Egress Design Solutions -- A guide to Evacuation and Crowd Management Planning, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2007
- [10.29] ISO 13571: Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time available for escape using fire date International Standardization Organization (ISO), 2007.

- [10.30] *PURSER, D. A.*: Toxicity Assessment of Combustion Products, In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section Two, Chapter 6 National Fire Protection Association (NFPA), 2002, 1, S. 2-83-2-171.
- [10.31] *MEHL, F.*: Richtlinien für die Erstellung und Prüfung von Brandschutzkonzepten, Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbauten, 2004, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 178, 2004, S. 109-134.
- [10.32] MVStättVO Versammlungsstättenverordnung, Fassung Juni 2005. IS-Argebau.de.
- [10.33] *PREDTETSCHENSKI, W. M.; MILINSKI, A. I.*: Personenströme in Gebäuden – Berechnungsmethoden für die Projektierung, Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1971.
- [10.34] *HELBING, D. & MOLNAR: P.* Social force model for pedestrian dynamics Physical Review, 1995.
- [10.35] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2/NA: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [10.36] RiMEA Richtlinie für Mikroskopische Räumungsanalysen, Version: 2.2.1, 2009
- [10.37] NFPA 101: Life Safety Code National Fire Protection Association (NFPA), 2008.
- [10.38] *FLEISCHMANN, C.*: Is Prescription the Future of Performance-based Design? Proceedings of the 10th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS), 2011.
- [10.39] Normenausschuss Bauwesen im DIN: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen, Beuth Verlag, Berlin, 1981.
- [10.40] *SCHNEIDER, J.*: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure, Verlag der Fachvereine (vdf), Zürich, 1994.
- [10.41] *PEACOCK, R. ET AL*: CFAST 6.1 - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6), Technical Reference Guide, 2009.
- [10.42] *SIEMON, M.*: Zuverlässigkeitsorientierte Bewertung der sicheren Räumung im Brandfall mit Hilfe von Ingenieurmethoden, Diplomarbeit, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 2011.
- [10.43] *BUCHER, C.*: Adaptive sampling-an iterative fast Monte Carlo procedure, Structural Safety, 1988, 5(2), 119-126.
- [10.44] BS7974 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice. British Standards Institution (BSI), 2001.
- [10.45] *ALBRECHT, C.; HOSSER, D.*: A Response Surface Methodology for Probabilistic Life Safety Analysis using Advanced Fire Engineering Tools, Proceedings of the 10th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS10), 2011.
- [10.46] *MC GRATTAN, K. et al.*: Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical Model, 2009.

- [10.47] *BRYNER, N. P.; MADRZYKOWSKI, D.; GROSSHANDLER, W. L.*: Reconstructing the Station Nightclub Fire: Computer Modeling of the Fire Growth and Spread, Proceedings of the 11th International Interflam Conference (INTERFLAM 2007), interScience Communications, 2007.
- [10.48] *FORELL, B.* Niveau der Personensicherheit von Versammlungsstätten - Nachweis nach vfdb-Leitfaden. Tagungsband 56. Jahresfachtagung der vfdb, Leipzig, 20.-23. Mai 2007.
- [10.49] Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) „Grundsätze zur Auslegung des § 14 MBO“; u. a. veröffentlicht in: DIBt Mitteilungen, Heft 1/2009,S.11/12.
- [10.50] Evaluierungsbogen zu Maßnahmen des Vorbeugenden Brand- und Gefahrenschutzes (Einsatzstellenbegehung). Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz der deutschen Feuerwehren (FA VB/G).
- [10.51] DIN 18009-1:2016-09, Brandschutzingenieurwesen – Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung.
- [10.52] *SCHRÖDER, B.*: Multivariate Methods for Life Safety Analysis in Case of Fire; Dissertation, Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2016.
- [10.53] Brandschutzrichtlinie 27-15de Nachweisverfahren im Brandschutz. Brandschutzrichtlinie, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), 2015.
- [10.54] *KLINZMANN, C., HOSSER, D.*: Berücksichtigung abwehrender und anlagentechnischer Maßnahmen beim brandschutztechnischen Nachweis von Bauteilen; vfdb-Zeitschrift 58 (2009) Heft 2.

ANHANG 1 BEGRIFFE, SYMBOLE UND EINHEITEN

A1.1 Begriffserläuterungen

Begriffe/ Kenngößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Abbrand	[kg]	Verbrannte Masse der Brandlast nach definierter Branddauer. Im Brandversuch mit Abbrandwaage gemessener Massenverlust.
Abbrandrate	\dot{m} [kg/s]	Verbrannte Masse der Brandlast je Zeiteinheit. Die Abbrandrate ist über den effektiven Heizwert mit der Wärmefreisetzungsrate verknüpft: $\dot{Q} = \dot{m} \cdot H_{\text{eff}}$. Sie entspricht bei brandlastgesteuertem Brandverlauf der Pyrolyserate.
Abbrandrate, flächenbezogen	\dot{m}'' [kg/(m ² ·s)]	Bei der Verwendung von „Stoffkenngößen“ für die flächenbezogene Abbrandrate ist zu beachten, dass die Bezugsfläche (m ²) die Fläche der brennenden Oberfläche ist und nicht die Grundfläche, auf der sich diese Gegenstände befinden [4.26].
Abbrandrate, flächenspezifisch	\dot{m}'' [kg/(m ² ·s)]	Verbrannte Masse der brennbaren Stoffe je Zeit- und Flächeneinheit, bezogen auf die Grundfläche
Abklingphase	-	Phase des Brandes, im Anschluss an die Vollbrandphase mit deutlich abnehmender Brandleistung.
Aktivierungszeit	t [s]	Zeitintervall zwischen dem Ansprechen eines Messwertgebers und der vollen Betriebsbereitschaft einer Löschanlage, einer Entrauchungsanlage, eines Alarmsystems oder eines anderen Brandschutzsystems
Akzeptierte Eintretenswahrscheinlichkeit		Die Eintretenswahrscheinlichkeit möglicher Szenarien, die als allgemein gesellschaftlich anerkannt angesehen werden kann (z. B. weil sie mit vertretbarem Aufwand nicht weiter gesenkt werden kann).

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Allgemein anerkannte Grenzwerte		<p>Als allgemein anerkannt können Grenzwerte angesehen werden, die allgemein angewandt werden und beispielsweise in technischen Regeln oder anderen vornormativen Grundlagen definiert werden.</p> <p>Allgemein anerkannt sind Beurteilungswerte, die als Grundlage von aaRdT oder von bauordnungsrechtlichen Regelwerten verwendet werden.</p>
äquivalente Branddauer (nach DIN 18230)	t_a [min]	Zeit in Minuten, bei der im betrachteten Bauteil im Normbrand nach ETK näherungsweise dieselbe Wirkung (z.B. Temperatur am bzw. im Bauteil) erreicht wird, wie im natürlichen Schadenfeuer.
Ausbeute Y	[g/g]	Bildungs- oder Freisetzungsanteile für Brandprodukte wie Ruß und Schadstoffe beim Abbrand.
Bemessungsbrand (engl.: design fire)	-	<p>Quantitative Beschreibung eines bemessungsrelevanten Brandverlaufs durch die (in der Regel zeitabhängige) Wärmefreisetzungsrate bzw. Abbrandrate sowie gegebenenfalls weitere Brandkenngrößen wie z. B. die Ausbeute an Verbrennungsprodukten oder das Rauchpotential.</p> <p>Im Zusammenhang mit einem (rechnerischen) Nachweisverfahren spricht man auch von der Festlegung eines geeigneten Quellterms.</p>
Bemessungsbrandszenario	-	<p>Ein festgelegtes Brandszenario, mit dem eine Brandschutzanalyse bzw. eine brandschutztechnische Auslegung durchgeführt wird.</p> <p>Es beinhaltet Angaben zum Brandort und zu Details des Brandgeschehens einschließlich der beteiligten Zündquellen und Stoffe und zu den Einflüssen von Personen, technischen Sicherheitssystemen und sonstigen anlagentechnischen Einrichtungen.</p>
Brandausbreitungsgeschwindigkeit	v_{aus} [m/min]	Geschwindigkeit der Flammenausbreitung auf der Oberfläche des Brandherdes in horizontaler oder vertikaler Richtung [4.26].

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Brandauswirkungen	-	Vom Brand ausgehende Phänomene wie eine Energie- und Stofffreisetzung mit Partikel- und Schadstoffemissionen.
Brandbelastung	q bzw. q'' [kJ/m ²] bzw. [kWh/m ²]	Synonym für Brandlastdichte.
Brandeinwirkungen	-	Auf die Umgebung (z. B. Menschen, Tiere, Bauteile) einwirkende Phänomene eines Brandes, wie die Wärmebeaufschlagung und Partikel- sowie Schadstoffimmissionen.
Brandentwicklungsfaktor	α [kJ/s ³] bzw. [kW/s ²]	Kenngröße zur Ermittlung der Wärmefreisetzungsrates während der Brandentwicklungsphase: $\alpha = 1000 \text{ kW} / t_{\alpha}^2$
Charakteristische Brandentwicklungszeit	t_{α} [s]	Zeitdauer einer α -t ² Brandentwicklung bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzungsrates von 1000 kW.
Brandfläche	A_F [m ²]	Fläche (hier „Bodenfläche“), auf der aktuell ein Abbrand stattfindet.
Brandherd	-	Lage (s. Brandort) und Größe des Brandes – häufig angewendet zum Beginn- des Bemessungsbrandes.
Brandlast	Q [kJ]	Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem (Raum-)Volumen einschließlich der Bekleidungen aller angrenzenden Oberflächen freigesetzt werden kann.
Brandlastdichte	q bzw. q'' [kJ/m ²] bzw. [kWh/m ²]	Brandlast, bezogen auf die jeweils anzusetzende Bezugsfläche. Rechenwert für die im Brandfall freigesetzte Wärmemenge; hat Einfluss auf die Brennzeit und auf die Höhe der Brandraumtemperatur.
brandlastgesteuert	-	Die Brandleistung wird nur durch die Abbrandrate und die Verbrennungseffektivität bestimmt. Es steht ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung.

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Brandleistung	\dot{Q} [kW]	Synonym für Wärmefreisetzungsrate. Sie enthält einen radiativen \dot{Q}_{rad} und einen konvektiven Anteil \dot{Q}_{konv}
Brandleistung, flächenbezogen	\dot{q} bzw. \dot{q}'' [kW/m ²]	Synonym für Wärmefreisetzungsrate, bezogen auf die Fläche, über der sich die brennenden Stoffe befinden.
Brandort	-	Lage des aktuellen Brandgeschehens im Raum.
Brandphasen	-	Einteilung (oft schematisch) des Brandverlaufs in bestimmte Zeit-Abschnitte (Phasen), die ein oder mehrere charakteristische gemeinsame Merkmale aufweisen.
Brandquelle	-	Begriff zur Kennzeichnung der Brandmodellierung in bestimmten Rechenmodellen (vgl. Kapitel 5).
Brandraum	-	Raum, in dem sich zunächst der Brandherd befindet und im weiteren Brandverlauf ein Abbrand stattfindet.
Brandregime	-	Abhängigkeit des Brandverlaufs vom Sauerstoffangebot: brandlastgesteuert oder ventilationsgesteuert.
Brandrisiko	-	Produkt aus erwarteter Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brands und seines Schadensausmaßes.
Brandschutzkonzept	-	Objektbezogene Brandschutzplanung mit Dokumentation.
Brandprodukte	-	Bei der Verbrennung freiwerdende Zersetzungsprodukte des Brandgutes, wie Rauchpartikel oder Kohlenmonoxid.
Brandstoffe, brennbare	-	Brennbare Stoffe, die im Brandverlauf gezündet werden können und abbrennen können.

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Brandszenario	-	Beschreibung der Art und zeitlichen Abfolge von Ereignissen, welche den Brandverlauf beeinflussen und auch rückwirkend vom Brandverlauf beeinflusst werden können. Diese Ereignisse stehen typischerweise im Zusammenhang mit der baulichen Struktur, Ventilationsbedingungen, brandschutztechnischen Einrichtungen, Löschmaßnahmen und / oder dem Verhalten von Personen. Technisch gesehen, werden unter einem Brandszenarium die Anfangs- und Randbedingungen, die für die Durchführung eines (rechnerischen) Nachweises mit einem geeigneten Modell nötig sind, verstanden.
Brandverlaufskurve	-	Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate (Entwicklung-, Vollbrand-, Abklingphase)
Brennwert (früher: oberer Heizwert H_o)	H_s [kJ/kg] bzw. [kWh/kg]	Maß für die spez. thermische Energie je Bemessungseinheit. Prüfung im Bomben-Kalorimeter nach DIN 4102-1 und DIN EN ISO 1716.
deterministisch	-	Quantitativ bestimmbar, als Ergebnis eines fixen Zusammenhangs zwischen einer bestimmten Ausgangslage und einem Ergebnis. Gegensatz von probabilistisch (die Wahrscheinlichkeit berücksichtigend).
Emissionsgrad	ϵ [-]	Quotient aus der von einer Strahlungsquelle erzeugten Strahlung und der Strahlung, die bei der gleichen Temperatur von einem Planck'schen Strahler erzeugt würde.
Flucht	-	Selbstrettung. Verlassen eines potentiell oder real gefährdeten Bereiches aus eigener Kraft. Die Flucht endet sobald der gefährdete Bereich verlassen ist.
Entstehungsbrand	-	Der Brand ist räumlich lokalisiert (s. Brandherd). D. h. er ist auf ein Objekt oder eine zusammenhängende räumlich eng begrenzte Objektgruppe beschränkt.
erforderliches Sicherheitsniveau		Festgelegtes Sicherheitsniveau, ausgedrückt durch Bemessungswerte, dass die festgelegten Bemessungssituationen auf der sicheren Seite liegend abdeckt.
Evakuierung	-	Geplante und organisierte Verlegung von Personen aus einem Bereich mittelbarer Gefahr.

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
expert judgement	-	Einschätzungen von Sachverständigen unter Verwendung deren Expertenwissens.
Flashover	-	Übergang zu einer Brandphase, in der die gesamte Oberfläche der brennbaren Stoffe in einem (geschlossenen) Raum am Brand beteiligt ist (Vollbrand). Der Flashover ist durch einen sehr steilen Anstieg der Brandverlaufskurve charakterisiert.
Flashover-Temperatur	[°C]	Temperatur der Heißgasschicht, bei der der Flashover eingeleitet wird.
Flashover-Zeit	[s]	Zeit, bei der der Flashover eintritt.
Brandentwicklungsgeschwindigkeit beim Flashover	v_{fo} [kW/s]	Rechenwert für den Anstieg der Wärmefreisetzungsrate ab dem Eintritt des Flashovers.
Fluchtweg	-	Verkehrswege, an die besondere Anforderungen zu stellen sind und die der Flucht aus einem möglichen Gefährdungsbereich und in der Regel zugleich der Rettung von Personen dienen. Fluchtwege führen in einen sicheren Bereich oder direkt ins Freie.
Feuerwiderstand		Fähigkeit eines Probekörpers für einen definierten Zeitraum einem bestimmten (Norm-)Feuer standzuhalten oder Schutz gegen einen Brand zu gewähren.
Gefährdung		Potenzielle Schadensquelle. Ganz konkret auf eine bestimmte Situation oder bestimmtes Objekt bezogene Gefahr.
Gefährdungssituation		Zustand, in dem Menschen, Güter oder die Umwelt einer oder mehrerer Gefährdungen ausgesetzt sind
Gefahr		Möglichkeit einer Gefährdungssituation.
Geometrisches Brandmodell	-	Modell zur Bestimmung der Brandverlaufskurve unter Verwendung der zeitlichen Entwicklung der Brandfläche, der Massenabbrandgeschwindigkeit, des Heizwertes und der Verbrennungseffektivität.

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Glimmbrand	-	Unvollständige Verbrennung bei ungenügender Sauerstoffzufuhr, ohne Flammenbildung, jedoch mit Lichterscheinung.
Grenzwerte		Zahlenwerte für die einzelnen Schutzzielkriterien, bei deren Überschreitung von einer Nichterfüllung des Schutzzieles ausgegangen werden soll.
Heizwert (früher unterer Heizwert H_u)	H_i [kJ/kg] bzw. [kWh/kg]	Verbrennungswärme bei vollständiger Verbrennung, beschreibt über die flächenspezifische Abbrandrate vorrangig die Wärmefreisetzungsrate.
Effektiver Heizwert	$H_{\text{eff}} = \chi \cdot H_i$ [kJ/kg]	Produkt aus Heizwert H_i und der Verbrennungseffektivität χ .
Inkubationszeit der Brandentwicklung	[s]	Dauer eines Brandes vor dem rechnerischen Brandbeginn. (Vor dem Beginn des Bemessungsbrandes.)
Leistungskriterien		quantitative Kriterien, die eine zulässige Basis zur Beurteilung der Sicherheit eines Ausführungsvorschlags für eine bauliche Anlage darstellen. Über- oder Unterschreitung der Leistungskriterien können Hinweise auf die Nichterfüllung der Schutzziele geben.
Massenabbrandgeschwindigkeit, flächenspezifisch	v_{ab} [kg/(m ² ·min)]	Die Massenabbrandgeschwindigkeit ermöglicht die Ermittlung der flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate in Verbindung mit H_i . Diese Werte beziehen sich auf die Projektion der Brandlasten auf die Grundfläche. Synonym für flächenspezifische Abbrandrate \dot{m}''
mögliches Brand-szenario	-	Brandszenario, das sich auch bei sehr unwahrscheinlichen Randbedingungen eintreten kann.
natürlicher Brand	-	Brandverlauf, der von den normativ festgelegten Brandverläufen abweicht. Er wird auf der Basis von objektspezifischen Annahmen für Modellanwendungen als Bemessungsbrand festgelegt.

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
normative Bemessungsbrände	-	Nominelle Temperaturzeitkurven oder auf Grundlage von Bemessungsbränden berechnete natürliche Brände.
Öffnungsbedingung	-	Kriterien, wie oder unter welchen Bedingungen sich die Öffnungsflächen und die Volumenströme im Brandverlauf verändern.
Personensicherheit		Personen können im Allgemeinen als sicher angesehen werden, wenn sie sich in einem sicheren Bereich (= im Kontext des Brandschutzes in einem nicht durch kritische Medien oder Temperaturen beeinträchtigten Bereich) oder sie sich in einem Bereich befinden, der zwar durch kritische Medien beeinträchtigt wird, diese die allgemein anerkannten Grenzwerte aber nicht überschreiten.
Plume	-	Oberhalb eines Brandherds aufsteigender Rauchgas- und Wärmestrom mit einer veränderlichen Temperatur, Geschwindigkeit und Masse. Seine Modellierbarkeit beginnt erst ab einer gewissen Höhe oberhalb der brennenden Gegenstände.
Pyrolyseprodukte	-	Durch Wärmeeinwirkung auf ein Brandgut entstehende thermische Zersetzungsprodukte oder Dämpfe.
Pyrolyserate	[kg/s]	Vom Brandgut je Zeiteinheit freigesetzte Masse [kg] Pyrolyseprodukte oder -dämpfe. Entspricht bei brandlastgesteuertem Brandverlauf der Abbrandrate.
Quellterm	-	Die Beschreibung der Wärmefreisetzungsrates sowie der zeitlichen Freisetzung von Brandprodukten.
Rauchpartikel-Massenentstehungsanteil bzw. Rauchausbeute bzw. Ausbeute	Y z. B. $Y_{\text{Ruß}}$ [g _{Ruß} /g _{verbrannter Stoff}]	Massenanteil der durch Verbrennung frei werdenden Rauchpartikel aus der Brennstoffmasse, typische Ausbeuten mit Relevanz für Nachweisverfahren die Rußausbeute $Y_{\text{Ruß}}$ bzw. Y_{s} sowie die Ausbeuten für Kohlenmonoxid und Kohlendioxid Y_{CO} bzw. Y_{CO_2} .
Rauchpotential	D_m [m ² /kg]	Maß für die sich trübende Eigenschaft des Brandrauches (optische Rauchdichte); wesentlich abhängig von der stofflichen Zusammensetzung des Brandguts und den Ventilationsbedingungen (weitere Details Kap.8).

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Räumung		Leerung einer baulichen Anlage oder eines Teils einer baulichen Anlage aufgrund einer potenziellen oder realen Gefahr für betroffene Personen. Evakuierung in unvorhergesehenen Fällen mit akutem Handlungsbedarf, die hauptsächlich zu einer Selbstrettung führt.
Rettungsweg		Rettungswege sind Verkehrsflächen, die sowohl für die Flucht von Personen aus akuten Gefahrenlagen vorgesehen werden als auch als Angriffswege von Einsatzkräften genutzt werden sollen.
Risiko		Maß für die Größe einer Gefahr. Produkt der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts und seines Schadensausmaßes [€; Verletzte Personen].
Risikoanalyse	-	Systematische Nutzung verfügbarer Informationen, um Gefährdungen (für Individuen oder Bevölkerungsgruppen, Sachanlagen oder Umwelt) zu identifizieren und Risiken einzuschätzen.
Risikobewertung	-	Auf der Risikoanalyse basierendes Verfahren, nach dem festgestellt wird, ob ein vertretbares Risiko überschritten wurde. Abwägen von Vor- und Nachteilen und Festlegung welche Risiken akzeptierbar sind oder akzeptiert werden müssen.
Sauerstoffangebot	-	Für die Verbrennung im Brandraum verfügbarer Sauerstoff.
Schaden	-	Verletzung oder Schädigung der Gesundheit von Menschen oder Schädigung von Gütern oder der Umwelt.
Schadensausmaß		<p>Bezifferung des Ausmaßes eines Schadens infolge eines eingetretenen Szenarios. Art und Weise der Bestimmung nicht geregelt. Bei Bauwerken häufig die Wiederherstellungskosten.</p> <p>Die Kriterien des Schadensausmaßes sind die gleichen, die für die Schutzzielkonkretisierung verwendet werden, weil das Schutzziel immer eine Begrenzung des Schadensausmaßes zum Ziel hat.</p>

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Schwelbrand	-	Unvollständige Verbrennung bei ungenügender Sauerstoffzufuhr, ohne Flammenbildung oder Lichterscheinung
Sicherheit		Nichtvorhandensein von Gefahren eines Zustandes, der unerreichbar ist. Ein Zustand gilt als sicher, wenn er ein vergleichbar kleines oder nicht akzeptiertes Risiko enthält.
Sicherheitsfaktor		Faktor zwischen einem Nennwert (in einer technischen Regel z. B. Fraktilwert) und dem in der Bemessung zu verwendenden Wert.
Sicherheitsformat		Bemessungsgleichungen (im Sinne von $E(\text{inwirkung}) < W(\text{iderstand})$) für die jeweiligen Nachweise unter Verwendung von Nennwerten und Sicherfaktor(en).
Sicherheitskonzept		Festlegung eines Sicherheitsformates sowie von Nenn- und über Sicherheitsfaktoren von Bemessungswerten zur Gewährleistung eines Sicherheitsniveaus.
Sicherheitsniveau/ vorhandenes Sicherheitsniveau		Durch Sicherheitsfaktoren und Nennwerte gebildetes Ausmaß an Sicherheit (ausgedrückt z. B. durch den Zuverlässigkeitsindex β oder eine Versagenswahrscheinlichkeit p_f), das durch auf der sicheren Seite liegende Bemessungswerte die Mehrzahl von Bemessungssituationen abbildet. (verwendet für Richtlinienerfüllung)
Sonderbau		Gebäude besonderer Art oder Nutzung, das mindestens einen der Tatbestände aus §2 Abs. 4 MBO erfüllt.
thermischer Impuls		Produkt aus der Wärmestromdichte und der Einwirkungszeit (verwendet als Kriterium für die Entzündung von Stoffen durch Wärmestrahlung).
ventilationsgesteuerter Brand		Brandentwicklung bei einem Sauerstoffangebot, das für eine vollständige Verbrennung innerhalb des Brandraumes nicht ausreicht. Synonym für einen unterventilierter Brand.

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Verbrennung		Exotherme, vollständige oder unvollständige Oxidation von Pyrolyseprodukten.
Verbrennungseffektivität	χ [-]	Verhältnis von im Brand freigesetzter Wärme zur max. möglicher Wärme resultierend aus dem Heizwert H_i und der Pyrolyserate.
Voll entwickelte Brände	-	Am Brand beteiligen sich alle in einem bestimmten Teil eines Raumes vorhandenen brennbaren Stoffe („Vollbrand“ auf einer Teilfläche).
Vollbrand	-	Brandphase, in der die gesamte Oberfläche der brennbaren Stoffe in einem (geschlossenen) Raum am Brand beteiligt ist. Der Vollbrand braucht immer Öffnungen zur Sauerstoffnachfuhr.
vollprobabilistisch		Nachweisführung mit probabilistischen Methoden (z. B. der Zuverlässigkeitsanalyse) bei denen für alle maßgeblichen (d. h. einen wesentlichen Einfluss aufweisenden) Parameter streuende Größen mit ihren Verteilungen und entsprechenden Parametern genutzt werden
vollprobabilistische Vorwärtsberechnungen		Vorwärtsberechnung auf Grundlage von probabilistischen Methoden und streuenden Eingangsgrößen für die wesentlichen Parameter unter Verwendung des Zuverlässigkeitsindex β als Maßzahl für das Sicherheitsniveau.
Vorbrennzeit	[s]	siehe Inkubationszeit
Vorwärtsberechnung / Prinzip der Vorwärtsberechnung		Berechnung des vorhandenen Sicherheitsniveaus (ausgedrückt durch Maßzahlen jedweder Art) mit (probabilistischen) Methoden bei dem mit allgemein anerkannten Bemessungsverfahren Bemessungssituationen nachgerechnet werden. Berechnungen zur Quantifizierung von Bemessungssituationen auf der Basis von sowohl deterministisch festlegbaren Parametern in Kombination mit streuenden Parametern unter Berücksichtigung deren Verteilungsfunktionen.

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Wärmefreisetzung	Q [kJ]	durch Verbrennung erzeugte Wärmeenergie (Wärmemenge)
Wärmefreisetzungsrates	\dot{Q} [kW]	Wärme, die bei der Verbrennung eines Materials pro Zeiteinheit frei wird. Für Nachweiszwecke ist es wichtig zu unterscheiden zwischen dem konvektiven Anteil (der als Quellterm für die auftriebsbehaftete Konvektionsströmung der Brandgase zur Verfügung steht) und dem Strahlungsanteil.
Wärmefreisetzungsrates, flächenspezifisch bzw. Brandleistung, flächenbezogen	\dot{q} [kW/m ²] bzw. \dot{q}'' [kW/m ²]	Die flächenspezifische Wärmefreisetzungsrates ist die auf die (horizontale) Grundfläche des Brandes bezogene Brandleistung, vgl. auch DIN 18230-3. Die flächenbezogene Brandleistung bezieht sich auf die freie Oberfläche des Brandstoffes, unabhängig von der Anordnung am brennbaren Gegenstand. vgl. auch ISO 5660-1.
Wärmefreisetzung flächenspezifisch		Synonym für auf die Grundfläche des Brandherdes (flächen-)bezogene Brandleistung.
Wärmefreisetzung, spezifische		Wärmefreisetzungsrates, bezogen auf die freie Oberfläche der Brandstoffe
Wärmekapazität, spezifische	c_p [J/(kg·K)]	Wärmemenge, die notwendig ist, um die Temperatur eines Gegenstands mit einer Masse von 1 kg um 1 K zu erhöhen
Wärmeleitfähigkeit	λ [W/(m·K)]	Kenngrößen, die sich auf die Geschwindigkeit beziehen, mit der Wärme durch ein Material hindurchströmt
Wärmestrom	\dot{Q} [kW]	Abgegebene, übertragene oder empfangene Wärmemenge je Zeiteinheit.
Wärmestromdichte	\dot{q} bzw. \dot{q}'' [kW/m ²]	Abgegebene, übertragene oder empfangene Wärmemenge je Oberflächen- und Zeiteinheit.
Wasserbeaufschlagung	W [mm/s]	flächenbezogener Volumenstrom an Wasser, der von aktivierten Sprinklern abgegeben wird

Begriffe/ Kenngrößen	Symbole/ Einheiten	Erläuterung
Wirkfläche	[m ²]	maximale Fläche, über der für die Auslegung davon ausgegangen wird, dass sich Sprinkler bei einem Brand öffnen
Maßgebliche Szenario	-	Brandszenario mit für die Festlegung von Bemessungs-Brandszenarien hinreichender Auftretenswahrscheinlichkeit. Nach DIN 18009-1 handelt es sich dabei um eine größere Anzahl von „maßgeblichen“ Szenarien, deren Auftretenswahrscheinlichkeit während der relevanten Zeitdauer auch hinreichend groß ist und die Schäden / Wirkungen verursachen können, die einer Bemessung zugeführt werden müssen. Unter Berücksichtigung solcher Szenarien werden die Bemessungsszenarien ausgewählt oder festgelegt / entwickelt. Wichtig ist für Bemessungsfragen, dass hier nicht spezielle Einzelszenarien zur Anwendung kommen müssen, sondern dass hier für die Bemessung geeignete (abdeckende) Szenarien gewählt oder festgelegt / entwickelt werden.
Zeitspanne für die Selbstrettung (en: available safe escape time; ASET)		Berechnete Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt der Entzündung und dem Zeitpunkt, an dem sich die Bedingungen so verändern, dass davon auszugehen ist, dass der Nutzer als handlungsunfähig betrachtet wird und daher nicht mehr in der Lage ist, die Flucht zu ergreifen oder erfolgreich abzuschließen.
Zündinitial	-	Energiequelle, die verwendet wird, um in Brandversuchen eine Verbrennung einzuleiten. Das Zündinitial ist auch Gegenstand des Bemessungsbrandes und des Bemessungsbrand-Szenarios.
Zündphase	-	Das Brandgut wird durch Zuführung von Zündenergie so thermisch aufbereitet, dass die notwendige Zündtemperatur erreicht und die für eine selbständige Verbrennung notwendige zusätzliche Mindestenergie zugeführt wird.
Zuverlässigkeit	-	Fähigkeit eines technischen Systems, innerhalb vorgegebener Grenzen den durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen.

A1.2 Symbole und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
α	Brandentwicklungsfaktor	kW/s ²	entfällt
α	Wärmeübergangszahl	W/(m ² ·K)	entfällt
α	Konstante	-	0,44
α_c	Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion	W/(m ² ·K)	entfällt
α_{inst}	instationäre Wärmeübergangszahl	kW/(m ² ·K)	entfällt
α_L	Zusatzbeiwert für brandschutztechnische Infrastruktur	-	entfällt
β	Zuverlässigkeitsindex	-	entfällt
β^2	Verhältnis Temperatur zu Geschwindigkeit im Profil	-	0,913
χ	Verbrennungseffektivität	-	entfällt
χ_{O_2}	Sauerstoffausnutzungsgrad	-	entfällt
χ_r	radiativer Anteil der Wärmefreisetzungsrate	-	entfällt
ε_m	Emissivität der Bauteiloberfläche	-	entfällt
ε_{res}	resultierender Emissionsgrad ($= \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m$)	-	entfällt
ε_f	Emissivität des Brandes	-	entfällt
γ	Sicherheitsbeiwert	-	entfällt
γ_{GA}	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen in Verbindung mit außergewöhnlichen Einwirkungen	-	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
$\gamma_{n,c}, \gamma_{n,r}$	Faktor zur Berücksichtigung nationaler Brandversuche	-	entfällt
$\gamma_{M,fi}$	Teilsicherheitsbeiwert für Materialkennwerte bei Brandbeanspruchung	-	entfällt
γ_R, γ_S	Teilsicherheitsbeiwerte	-	entfällt
η_{fi}	Reduktionsfaktor für mechanische Einwirkungen im Brandfall (abhängig von Verhältnis $\xi = Q_{k,1}/G_k$)	-	entfällt
κ	Kármánkonstante	-	$\approx 0,4$
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	entfällt
λ_1	mittlere Auftretensrate von Entstehungsbränden je Quadratmeter Grundfläche und Jahr	-	1/(m ² ·a)
μ	Ausnutzungsfaktor für Bauteile nach Eurocodes	-	entfällt
ν	kinematische Viskosität	m ² /s	entfällt
ρ	Dichte des Gasgemisches	kg/m ³	entfällt
ρ	Dichte bzw. Rohdichte	kg/m ³	entfällt
$\bar{\rho}$	Dichte	kg/m ³	entfällt
ρ_s	Dichte des Stoffes	kg/m ³	entfällt
ρ_∞	Dichte der Umgebungsluft	kg/m ³	entfällt
ρ_∞	Gasdichte der Kaltgasschicht	kg/m ³	entfällt
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/(m ² ·K ⁴)	$5,67 \cdot 10^{-8}$
ξ	Temperaturverhältnis Rauchgasschicht (T_s) zu Kaltgasschicht (T_∞)	-	entfällt

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
$\Psi_{1,1}, \Psi_{2,i}$	Kombinationsbeiwerte nach EC 1 Teil 1	-	entfällt
Φ	Abschattungsfaktor	-	entfällt
θ	Temperatur	°C od. K	entfällt
$\Delta\theta$	Temperaturunterschied	K	entfällt
$\theta_{a,cr}$	kritische Stahltemperatur	°C	entfällt
θ_g	Heißgastemperatur (in der Bauteilumgebung)	°C	entfällt
θ_m	Oberflächentemperatur des Bauteils	°C	entfällt
θ_r	Strahlungstemperatur der Umgebung Wirksame Strahlungstemperatur des Brandes	°C	entfällt
τ	Einwirkzeit	min	entfällt
a	Temperaturleitzahl $\left(\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}\right)$	m ² /s	entfällt
a	Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter und Jahr	1/(m ² ·a)	entfällt
a	Konstante	m ² /P.	0,266
b	Exponent, der von der Art der Nutzung und der Unterteilung der Nutzungseinheit (Raumzellen) abhängt	-	entfällt
c	Betondeckung	mm	entfällt
c	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl	-	entfällt
c	Umrechnungsfaktor (in DIN 18230-1)	m ² /(kW·h)	entfällt
c_p	spezifische Wärme bzw. spez. Wärmekapazität der Kaltgasschicht	J/(kg·K) kJ/(kg·K)	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
c_{Rauch}	Rauchkonzentration	g/m^3	entfällt
$c_{\text{Ruß}}$	Massenkonzentration des Rauches	g/m^3	entfällt
c_v	spezielle Wärme bei konstantem Volumen	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	entfällt
d	Dicke der Rauchgasschicht	m	entfällt
f	Ähnlichkeitsfaktor	-	entfällt
f_{ck}	charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit	N/mm^2	entfällt
f_{pk}	charakteristischer Wert der Streckgrenze (Spannstahl)	N/mm^2	entfällt
$f_{\text{yk}}, f_{\text{ay}}$	charakteristischer Wert der Streckgrenze (Beton- / Baustahl)	N/mm^2	entfällt
g	Erdbeschleunigung	m/s^2	9,81
h	Gebäudehöhe	m	entfällt
h_{Fenster}	Höhe der Ventilationsöffnungen (Fenster, Türen etc.) als Zuluftöffnung	m	entfällt
$h_{\text{u,eff}}$	effektiver Heizwert	kJ/kg kWh/kg MJ/kg	entfällt
h_w	gemittelte, lichte Höhe der Öffnungen	m	entfällt
\dot{h}_c	die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandnebenerscheinungen im Brandraum freigesetzte Energie	$\text{J/s} = \text{W}$	entfällt
\dot{h}_g	die im Brandraum pro Zeiteinheit gespeicherte Energie der Rauchgase, welche die Brandraumtemperatur bestimmt	$\text{J/s} = \text{W}$	entfällt

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
\dot{h}_l	die durch den Gaswechsel (Konvektion durch Öffnungen) pro Zeiteinheit abströmende Energie der Rauchgase (Konvektionsenergie)	J/s = W	entfällt
\dot{h}_o	die durch die Fensterstrahlung pro Zeiteinheit entzogene Energie	J/s = W	entfällt
\dot{h}_s	sonstige pro Zeiteinheit verlorene Energieanteile (z. B. Speicherenergie von Einbauten)	J/s = W	entfällt
\dot{h}_w	die durch die Konvektion und Strahlung an die Umfassungsbauteile pro Zeiteinheit abgegebene Energie	J/s = W	entfällt
\dot{h}_{net}	Wärmestromdichte (Nettowärmestrom)	W/m ²	entfällt
$\dot{h}_{net,c}$	konvektiver Anteil des Nett-Wärmestroms	W/m ²	entfällt
$\dot{h}_{net,r}$	radiativer Anteil des Netto-Wärmestroms	W/m ²	entfällt
k	Kontante (Tabelle 9.7)	m/s	entfällt
k_Θ	temperaturabhängiger Reduktionsfaktor für Festigkeit und E-Modul	-	entfällt
k_{Verb}	Faktor zur Beschreibung der Verbrennungseffektivität ($\leq 1,0$)	-	0,80
l	Länge	m	entfällt
m	Abbrandfaktor (Lagerart, -dichte) für Brandlasten bei Ermittlung nach DIN 18230	-	
m	Masse des Rauchgases innerhalb des Raumes	kg	entfällt
m_{in}	zuströmende Luft	kg	entfällt
m_{out}	ausströmende Luft	kg	entfällt
\dot{m}''	flächenspezifische Abbrandrate	kg/(m ² s)	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
\dot{m}_g	die pro Zeiteinheit aus dem Brandraum strömenden Rauchgasmengen	kg/s	entfällt
\dot{m}_l	die pro Zeiteinheit in den Brandraum einströmenden Frischluftmengen	kg/s	entfällt
\dot{m}_L	Zuluftmassenstrom	kg/s	entfällt
\dot{m}_{O_2}	Sauerstoffmassenstrom	kg/s	entfällt
\dot{m}_p	Plume-Massenstrom	kg/s	entfällt
\dot{m}_{pl}	Massenstrom des Plumes in der Höhe z	kg/s	entfällt
p	Druck im Raum	Pa	entfällt
p_1	jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der Nutzungseinheit	-	entfällt
P_{21}	Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Nutzer	-	entfällt
P_{22}	Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr	-	entfällt
p_3	Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch eine automatische Löschanlage	-	entfällt
p_f	Versagenswahrscheinlichkeit	-	entfällt
$p_{f,fi}$	bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall	-	entfällt
p_{fi}	Auftretenswahrscheinlichkeit von mindestens einem fortentwickelten Brand (Schadenfeuer)	-	entfällt
p_v	partieller Dampfdruck	Pa	entfällt
Δp	Druckdifferenz	Pa	entfällt
q	Brandlastdichte	MJ/m ²	entfällt

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
q_m	mittlere Brandlastdichte	MJ/m ²	entfällt
q_R	rechnerische Brandbelastung (n. DIN 18230-1)	kWh/m ²	entfällt
r	horizontaler Abstand eines Sprinklers von der Plume-Achse	m	entfällt
r	radialer Abstand von der Plume-Achse	m	entfällt
r	stöchiometrischer Luftbedarf	kg _{Luft} / kg _{Brennstoff}	entfällt
s	stöchiometrischer Koeffizient	-	entfällt
t	Zeit	s min h	entfällt
t	Branddauer ohne Berücksichtigung der Zündphase / Schwelbrandphase	s	entfällt
$t_{1,fo}$	Zeitpunkt eines ggf. auftretenden Flashover	s	entfällt
t_α	charakteristische Brandentwicklungszeit; der Zahlenwert entspricht der Branddauer bis zum Erreichen einer Brandstärke von 1 MW	s	entfällt
t_{act}	Zeitpunkt bis zum Aktivieren einer anlagentechnischen Maßnahme (z. B. Löschanlage)	s	entfällt
$t_{\ddot{a}}$	äquivalente Branddauer	min	entfällt
t_{con}	Zeitpunkt der Brandkontrolle durch die Feuerwehr	s	entfällt
t_α	charakteristische Brandentwicklungszeit; der Zahlenwert entspricht der Branddauer bis zum Erreichen einer Brandstärke von 1 MW	s	entfällt
t_{sup}	Zeitpunkt der Brandeindämmung	s	entfällt
t_t	Mischzeit	-	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
Δt	Zeitintervall	s	entfällt
Δt	diskreter Zeitschritt	s	entfällt
erf t_F	rechnerisch Feuerwiderstandsdauer	erforderliche min	entfällt
u	Strömungsgeschwindigkeit	m/s	entfällt
u*	Schubspannungsgeschwindigkeit	m/s	entfällt
u bzw. a	Achsabstand der Bewehrung von der beflam- ten Betonoberfläche	mm	entfällt
u _m bzw. a _m	mittlerer Achsabstand	mm	entfällt
v	Geschwindigkeit	m/s	entfällt
v _{ab}	mittlere spezifische Abbrandgeschwindigkeit des Stoffes oder der Mischung aus verschiedenen Stoffen (Mittelwert über Massenanteile)	kg/m ² min	0,5 bis 3,4
v _{ab}	Massenabbrandgeschwindigkeit	kg/(m ² ·min)	entfällt
v _{aus}	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in horizonta- ler Richtung nach allen Seiten gleich schnell	m/min	0,25 bis 0,50
v _{jet,t}	Geschwindigkeit im Ceiling Jet	m/s	entfällt
w	spezifische Wasserbeaufschlagung	mm/s	≥ 0,07
w	Wärmeabzugsfaktor nach DIN 18230-1	-	entfällt
Δx	räumlicher Diskretisierungsschritt	m	entfällt
x, y, z	Raumkoordinaten	m	entfällt
z	Höhe des Plumes über der Brandherdgrundflä- che bzw. vertikaler Abstand zwischen Brand- herdoberfläche und Berechnungsort	m	entfällt

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
z_0	Rauhigkeitsparameter	-	entfällt
z_0	dynamische Rauigkeitslänge	m	entfällt
z_s	Höhe der Rauchschichtuntergrenze	m	entfällt
$z_{l,1}$	Distanz des realen Brandherdes zur Grenzfläche zwischen oberer und unterer Schicht	m	entfällt
$z_{l,2}$	Abstand der „virtuellen Wärmequelle“ von der Grenzfläche zwischen oberer heißer Rauchgasschicht und Kaltgasschicht	m	entfällt
A	Oberfläche	m ²	entfällt
A	pre-exponentieller Faktor	m/s	entfällt
A	Grundfläche der brandschutztechnisch abgetrennten Nutzungseinheit	m ²	entfällt
$A_d(t)$	Bemessungswert der indirekten Einwirkungen	-	entfällt
A_f	Grundfläche des Brandraumes	m ²	entfällt
$A_F(t)$	Brandfläche (mit Branddauer zunehmend)	m ²	entfällt
A_i	innere umschließende Fläche	m ²	entfällt
A_F	Brandfläche bei Beginn der Brandbekämpfung zum Zeitpunkt t_{act}	m ²	entfällt
$A_{F,max}$	Maximal beherrschbare Brandfläche	m ²	entfällt
A_T	Gesamte Innenflächen des Raumes	m ²	entfällt
A_t	innere Oberfläche des Brandraumes	m ²	entfällt
A_w	Öffnungsfläche	m ²	entfällt
\tilde{B}	gemittelter molekularer Anteil des Brennstoffs	-	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
C	örtlich gemessene Konzentration	-	entfällt
C	empirischer Parameter in Relation für Erkennungsweite	-	2 bis 10
C	materialabhängige Konstante	-	entfällt
C ₀	Ausgangskonzentration		entfällt
C _R	Modellparameter abhängig von Mischzeit, kinetischer Viskosität und turbulent kinetischer Energie	-	entfällt
C _T	Konstante	-	9,115
D	Brandherddurchmesser	m	entfällt
D	kritische Menge Carboyhämoglobin (COHb) im Blut, die zur Bewusstlosigkeit führt	Vol. %	entfällt
D _f	Branddurchmesser	m	entfällt
D _m	Rauchpotential (bezogen auf DL)	m ² /g	entfällt
D _L	optische Rauchdichte pro Weglänge	1/m	entfällt
E	Aktivierungsenergie	J/mol	entfällt
E	innere Energie des Rauchgases im Raum	kJ	entfällt
E _a	Aktivierungsenergie	J/mol	entfällt
E _{d,fi}	Bemessungswert der Schnittgrößen im Brandfall	-	entfällt
E _{d,fi,t}	Bemessungswert der Einwirkungen nach Eurocode 1 Teil 1-2	-	entfällt
E _i	innere Energie bei konstantem Volumen	kJ	entfällt

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
E_L	Wärmefreisetzung je umgesetzter Masse Frischluft	MJ/kg _L	entfällt
E_{O_2}	Wärmefreisetzung je umgesetzter Masse Sauerstoff	MJ/kg _{O2}	entfällt
F	normierter Quotient im FED-Modell	-	entfällt
F_s	spezifischer Personenstrom	P./(s·m)	entfällt
G_k	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen	-	entfällt
H	Raumhöhe bzw. Abstand zwischen Brandherd und Decke	m	entfällt
H_{hi}	mittlerer Heizwert des Stoffes oder der Mischung aus verschiedenen Stoffen (Mittelwert über die Massenanteile)	kWh/kg	siehe DIN 18230-3
H_i	Heizwert der brennbaren Stoffe 1 kWh = 3.600 kJ	kJ/kg kWh/kg MJ/kg	entfällt
Je	Jensen-Zahl	-	entfällt
K	Extinktionskoeffizient	1/m	entfällt
K_m	Extinktionskoeffizient pro Einheitsmasse Brennstoff	m ² /g	entfällt
L	Leuchtdichte	cd/m ²	entfällt
L	Weglänge	m	entfällt
L_v	temperaturunabhängige Verdampfungsenthalpie	J/kg	entfällt
LW	Löschwirkung	-	entfällt
M	Menge / Masse	kg	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
N	Personenanzahl	-	entfällt
P	Nutzeranzahl	-	entfällt
\bar{p}	gemittelter molekularer Anteil des Reaktionsprodukts	-	entfällt
\dot{Q}	Wärmefreisetzungsrate	kW od. MW	entfällt
\dot{Q}_s	Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt t_0 , an dem der Entstehungsbrand vom Objektbrand in einen sich über das Objekt ausbreitenden Brand übergeht (Beginn Bemessungsbrand)	kW	entfällt
$\dot{Q}(t)$	Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt t	kW od. MW	entfällt
$\dot{Q}(t)$	Wärmefreisetzungsrate unter Sprinklerschutz	kW	entfällt
$\dot{Q}(t_{act})$	Wärmefreisetzungsrate beim Öffnen der ersten Sprinklerdüse (t_{act})	kW	entfällt
$Q_{k,1}$	charakteristischer Wert der dominierenden veränderlichen Einwirkung	-	entfällt
$Q_{k,i}$	charakteristischer Wert weiterer veränderlicher Einwirkungen	-	entfällt
\dot{Q}_{LK}	Maximum der Wärmefreisetzungsrate bei Brandkontrolle durch die Löschanlage	MW	entfällt
\dot{Q}_{FO}	Brandleistung, bei der ein Flash-over eintritt	kW	entfällt
$\dot{Q}_{max,v}$	maximale Wärmefreisetzungsrate des ventilationsgesteuerten Brandes	kW	entfällt
$\dot{Q}_{max,f}$	maximale Wärmefreisetzungsrate des brandlastgesteuerten Brandes	kW	entfällt
\dot{Q}_R	Energieverlust aufgrund von Strahlung	kW	entfällt

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
$\max \dot{Q}_{\text{vent}}$	maximale Brandleistung in kleinen Räumen mit begrenzter Zuluftöffnung	kW	entfällt
\dot{Q}_c	konvektive Wärmeleistung	kW	entfällt
\dot{Q}^*	dimensionslose Wärmefreisetzungsrate	-	entfällt
$\dot{Q}_{1,1}^*$	dimensionslose Wärmefreisetzungsrate des realen Brandherdes	-	entfällt
$\dot{Q}_{1,2}^*$	dimensionslose Wärmefreisetzungsrate der „virtuellen Wärmequelle“	-	entfällt
R	den Widerstand beschreibende Zustandsvariable	-	entfällt
R	allgemeine Gaskonstante	J/(K·mol)	8,314
R	Risikoindex	-	entfällt
$R_{fi,d,0}$	Bauteilwiderstand zum Zeitpunkt $t = 0$	-	entfällt
$R_{d,t,fi}$	Bemessungswert des Widerstands im Brandfall	-	entfällt
RHR_f	Flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate	MW/m ²	entfällt
RTI	Response Time Index, Maß für die Ansprechempfindlichkeit des Sprinklers	$\sqrt{m \cdot s}$	entfällt
RMV	Atemrate	l/min	entfällt
\dot{R}	die pro Zeiteinheit umgesetzte Brandlast, welche die Wärmefreisetzung bewirkt	kg/s	entfällt
S	Erkennungsweite	m	entfällt
\tilde{S}	gemittelter molekularer Anteil des Sauerstoffs	-	entfällt
T	Temperatur	K	entfällt
T	Brandraumtemperatur	K	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
T	Temperatur der Oberfläche des Stoffes	K	entfällt
T ₀	Temperatur der Probekörper bei Versuchsbeginn	K	entfällt
T _∞	Temperatur der Umgebungsluft bzw. der Kaltgasschicht	°C od. K	entfällt
T _{jet}	Ceiling Jet-Temperatur	°C	entfällt
T _{jet,t}	Temperatur im Ceiling Jet zum Zeitpunkt t	°C	entfällt
T ₀	Temperatur der Probekörper bei Versuchsbeginn	K	entfällt
T _p	Plume-Temperatur	K	entfällt
T _s	Rauchgastemperatur	°C	entfällt
T _{D,t}	Sprinklertemperatur zum Zeitpunkt t	°C	entfällt
T _{Heißgas}	Rauchgastemperatur	°C	entfällt
ΔT	Temperaturdifferenz	K	entfällt
ΔT _{jet}	Temperaturdifferenz zwischen Ceiling Jet und Heißgasschicht	°C	entfällt
V	Volumen des Raumes (konstant)	m ³	entfällt
V	Gehgeschwindigkeit	m/s	entfällt
V	Verdünnungsverhältnis (= C ₀ /C ₁)	-	entfällt
Vis	Mindestsichtweite	m	entfällt
V _l	Volumen der Luftschicht	m ³	entfällt
V _s	Volumen der Rauchgasschicht	m ³	entfällt
V _{Hyp}	Verstärkungsfaktor zur Abschätzung des Effektes der Hyperventilation	-	entfällt

Anhang 1 Begriffe, Symbole und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
X_k	charakteristische Wert einer streuenden Größe	-	entfällt
Y_{Rauch}	Rauchpartikel-Entstehungsanteil	g/g	entfällt
$Y_{\text{Ruß}}$	Rußpartikel-Entstehungsanteil	g/g	entfällt
Y_i	Rauchausbeute	g/g	entfällt
Z	Grenzzustandsfunktion, Sicherheitsabstand zwischen einwirkender und widerstehender Größe	-	entfällt
Z_f	mittlere Flammenhöhe	m	entfällt
Z_n	Lage der neutralen Ebene	m	entfällt
Z_s	Lage der Rauchgasschicht	m	entfällt

ANHANG 2 ANWENDUNGSBEISPIEL

A2.1 Einleitung

An einem Beispiel soll die Bearbeitung einer brandschutztechnischen Aufgabenstellung mit Hilfe des Leitfadens dargestellt werden. Es handelt sich dabei um ein Hörsaalgebäude mit angrenzendem atriumartigem Bürogebäude. Bild A2.1 zeigt eine perspektivische Außenansicht der beiden Gebäude.

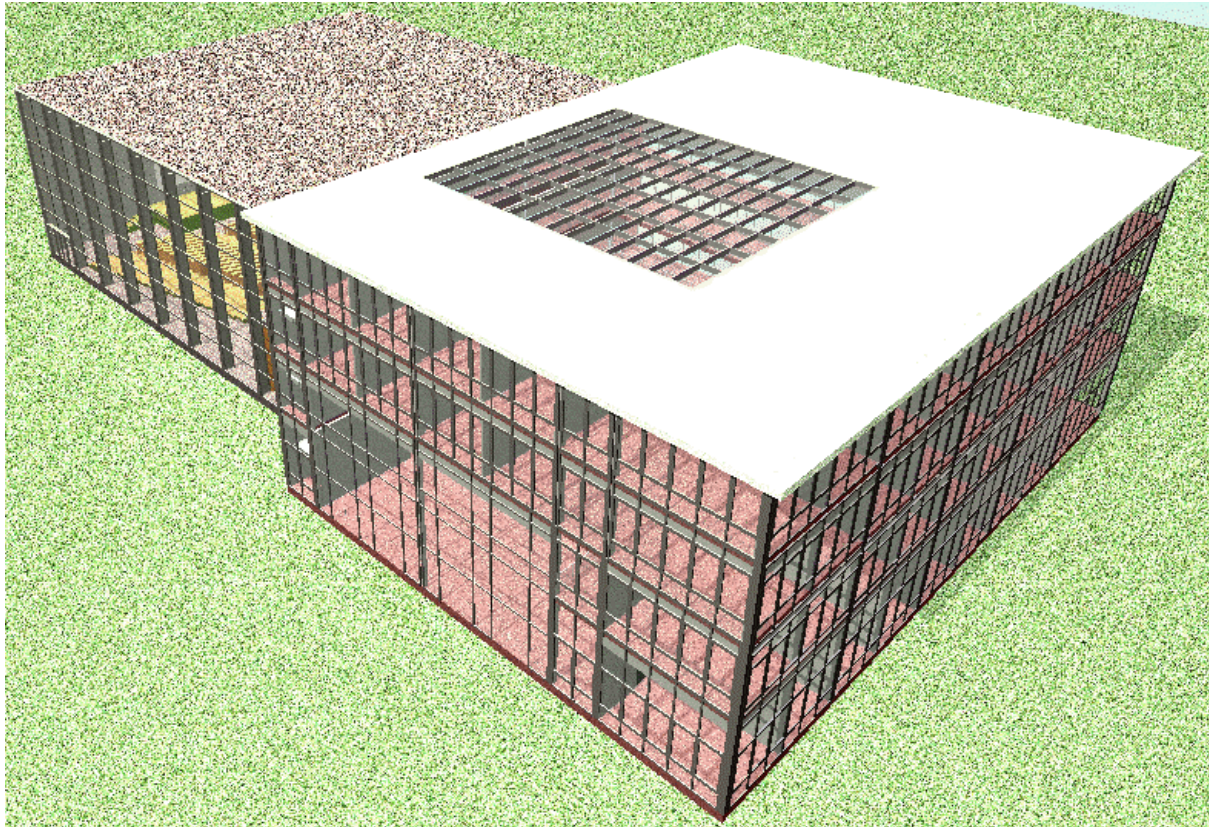


Bild A2.1 Gesamtansicht Hörsaal- und Bürogebäude

Das Hörsaalgebäude mit den Abmessungen 34 m x 29 m x 12 m (L x B x H) ist eine Versammlungsstätte mit ca. 650 Sitzplätzen. Bei Sonderveranstaltungen können sich durch zusätzliche Stehplätze bzw. Sitzen auf Treppenstufen bis zu 1.000 Personen im Gebäude aufhalten. Die leicht ansteigende Bestuhlung aus Holz wird durch Gänge unterteilt (Bild A2.2). An der Rückseite der Bestuhlung ist eine Wandscheibe mit Öffnungsflächen angeordnet, durch die man zum Eingang des Hörsaals gelangt. Der Hörsaal wird über eine breite Treppe vom Atrium des Bürogebäudes mit seinen Abmessungen 36 m x 27 m x 15 m (L x B x H) aus erschlossen, der Zugang befindet sich im 1. Obergeschoss (Bild A2.3). Um das innenliegende Atrium führen offene Galerien. Im Bereich der Bühne befinden sich zu beiden Seiten des Gebäudes Fluchttüren in der Fassade.

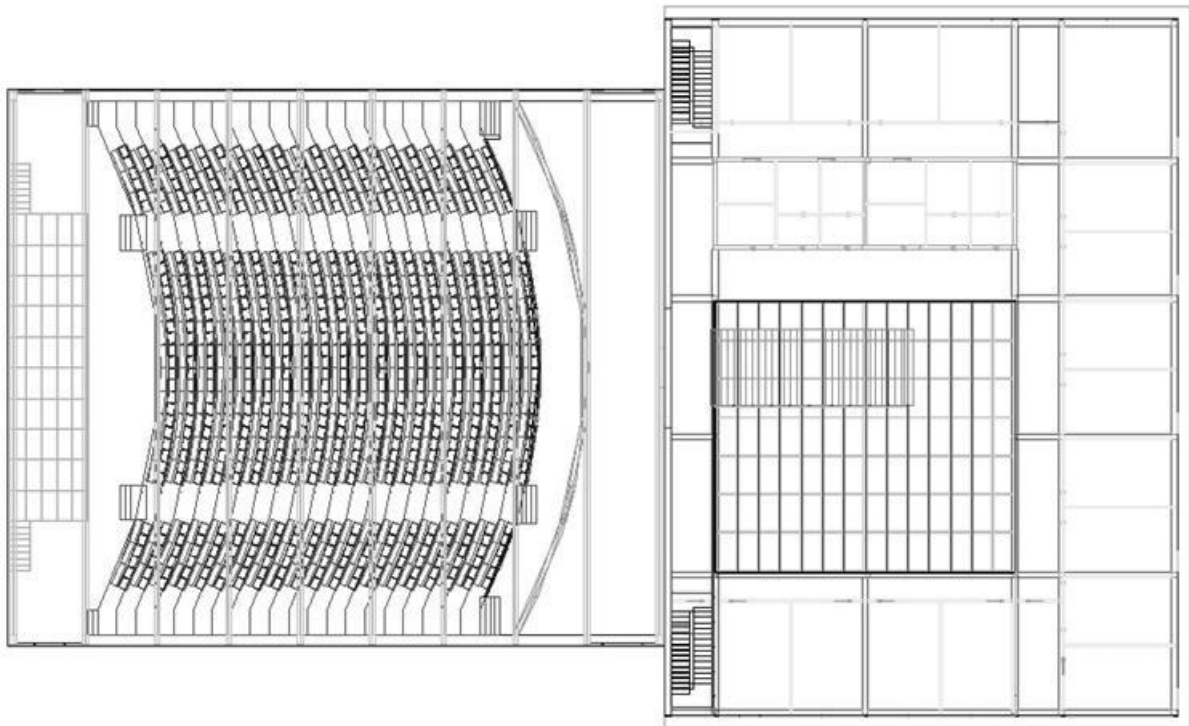


Bild A2.2 Grundriss des Hörsaal- und Bürogebäudes

Das Hörsaalgebäude besteht aus einer Stahlrahmenkonstruktion (Stützen und Riegel), die Rückwand als Übergang zum Atrium ist als Brandwand ausgeführt (Bild A2.4). Die Seitenwände sind als Stahl-Glas-Fassade ausgebildet. Das Dach besteht aus einer nichtbrennbaren Sandwichelementdecke. Für die Rauchableitung im Brandfall stehen öffnbare Fenster zur Zu- und Abluft auf beiden Seiten des Gebäudes zur Verfügung.

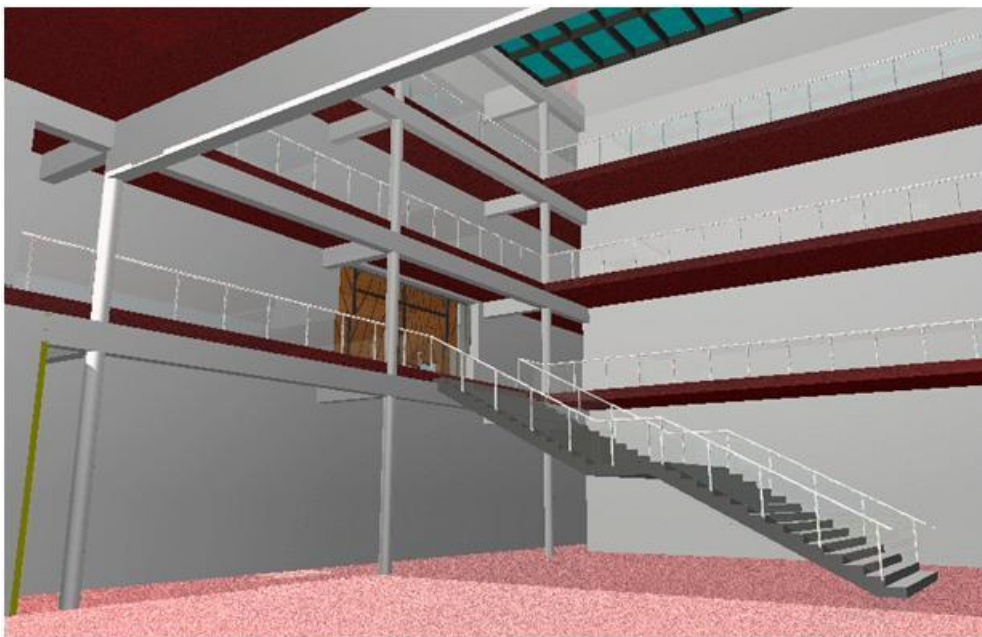


Bild A2.3 Aufgang zum Hörsaal aus dem Atrium des Bürogebäudes

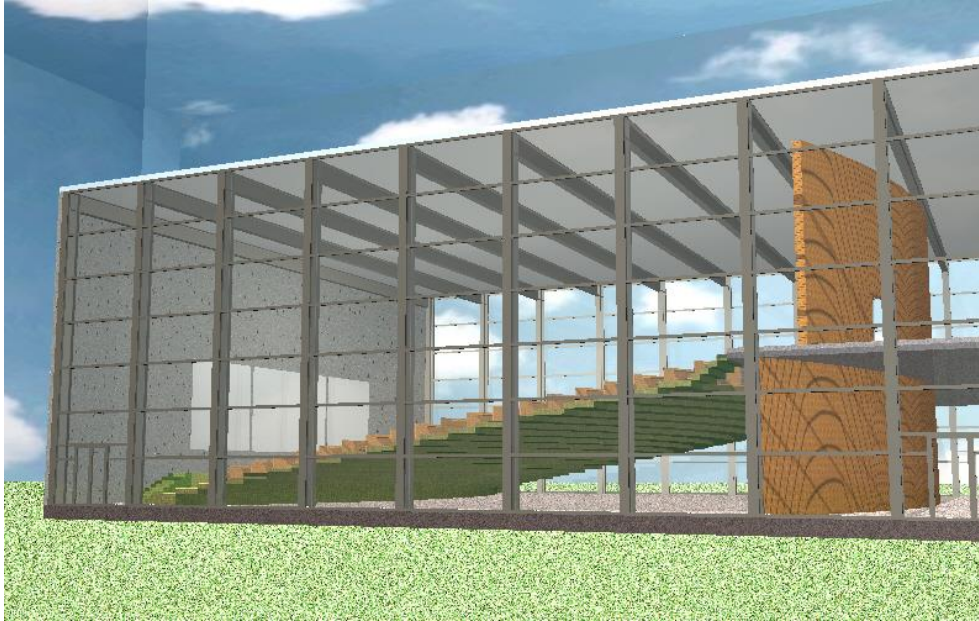


Bild A2.4 Stahlrahmenkonstruktion des Hörsaalgebäudes mit Stützen und Riegeln

Um das innenliegende Atrium des Verwaltungsgebäudes führen offene Galerien, der Zugang zum Hörsaal befindet sich im 1. Obergeschoss.

In den nachfolgenden Kapiteln dieses Anhangs werden die einzelnen Nachweisschritte hin zu einem schutzzielorientierten Brandschutzkonzept anwendungsbezogen beschrieben.

In A2.2 wird auf die Schutzziele eingegangen und deren Umsetzung am Projektbeispiel diskutiert, wobei die öffentlich rechtlichen Schutzinteressen entsprechend MBO [A2.1] und MVStättV [A2.2] hinsichtlich der Rettungswege in Anzahl, Länge und Breite im Vordergrund stehen. Anschließend werden die maßgebenden Brandszenarien ermittelt und die zugehörigen Bemessungsbrände festgelegt. Demnach sind zwei Szenarien zu untersuchen:

- Ein vollentwickelter Brand ohne Einwirkung von Löschmaßnahmen mit einer Wärmefreisetzungsrate von max. 224 MW soll als Auslegungsbrand für die Festlegungen zur Feuerwiderstandsdauer der Tragkonstruktion des Hörsaals verwendet werden.
- Ein sich entwickelnder Brand erreicht nach Intervention der Feuerwehr kurzfristig eine Wärmefreisetzungsrate von 38 MW und klingt danach ab. Dieses Szenario wird bei der Bewertung der Personensicherheit im Hörsaal verwendet.

In A2.3 wird eine abdeckende Temperaturzeitkurve für die Bewertung der Konstruktion des Hörsaalgebäudes abgeleitet, die in A2.4 weiterverwendet wird. Für die Untersuchungen werden die Vorgaben aus A2.2 hinsichtlich des vollentwickelten Brandes zugrunde gelegt. In A2.4 werden die brandschutztechnischen Nachweise von Bauteilen und Tragwerk (Stahlrahmenkonstruktion) durchgeführt. Unter Verwendung der ermittelten Temperaturzeitkurve für die Heißgastemperatur nach A2.3 unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften wird die Tragfähigkeit der Stahlrahmenkonstruktion mit folgenden alternativen Nachweisverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2 bestimmt und bewertet:

- Nachweis der Einzelbauteile mit dem vereinfachten Bemessungsverfahren,

- Ermittlung der Bauteiltemperaturen und Nachweis der Tragfähigkeit mit dem erweiterten Bemessungsverfahren.

Abschließend werden in A2.5 Nachweise zur Personensicherheit geführt mit der Maßgabe, die vorher definierten Schutzziele zu erreichen bzw. die zugehörigen Kriterien einzuhalten, insbesondere:

- Höhe der raucharmen Schicht,
- Optische Rauchdichte / Erkennungsweite,
- Rauchgastoxizität / Gaskonzentrationen.

Neben dem Brandszenario werden die Räumungsverläufe aus dem Hörsaal bewertet, indem unterschiedliche Modelle wie die Kapazitätsanalyse, das dynamische Strömungsmodell und verschiedene Individualmodelle eingesetzt werden. Die Ergebnisse werden mit den Angaben in der MVStättV verglichen.

A2.2 Schutzinteressen und Schutzziele

Die grundlegenden öffentlich-rechtlichen Schutzinteressen, die bei dem vorliegenden Anwendungsbeispiel durch entsprechende Maßnahmen zu wahren sind, können der Musterbauordnung (MBO) [A2.1] entnommen werden. Demnach sind bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und in Stand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

Darüber hinaus fällt das Anwendungsbeispiel aufgrund einer Dimensionierung für eine Besucherzahl von weit mehr als 200 in den Geltungsbereich der Versammlungsstättenverordnung des jeweiligen Landes bzw. wie hier gezeigt in den Bereich der Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättV) [A2.2]. Hieraus ergeben sich im Hinblick auf das baurechtliche Schutzziel der Personensicherheit besondere Anforderungen an die Rettungswege (Anzahl, Länge und Breite). Demgegenüber stehen Erleichterungen, wenn durch eine größere Raumhöhe vorhanden ist und eine ausreichende Rauchableitung sichergestellt werden kann, sodass die Rettungswege ausreichend lange zur Verfügung stehen, d. h. raucharm gehalten werden können. Das Schutzziel einer lange zur Verfügung stehenden und ausreichend hohen raucharmen Schicht ist als derart gewichtig zu betrachten, weil die Verhältnisse in der Heißgasschicht auch in größerer Entfernung vom Brandgeschehen für die Gesundheit und das Leben der Personen eine große Gefahr darstellen. Außerdem ist die raucharme Schicht erforderlich, um einen sicheren und wirkungsvollen Einsatz der Feuerwehr zu ermöglichen. Bei der Betrachtung des Risikos stehen nach [A2.3] die Anzahl der Besucher und die Größe der Versammlungsräume im Vordergrund.

Im vorliegenden Beispiel wird von den Anforderungen nach § 7 MVStättV dergestalt abgewichen, dass die maximale Rettungsweglänge mäßig überschritten wird und daher ein rechnerischer Nachweis mit Hilfe von Ingenieurmethoden, wie in A2.5 dargestellt, erforderlich wird. Um die Brandwirkungen im Hinblick auf die Personensicherheit beurteilen zu können, sind konkrete Akzeptanzwerte zu formulieren, wie beispielsweise eine Höhe der raucharmen Schicht

von $h = 2,5$ m. Diese setzt sich zusammen aus der durchschnittlichen Körperhöhe eines Menschen und einem Sicherheitsbeiwert [A2.3]. Die in den Tabellen 8.2 und 8.3 angegebenen Werte stellen Anhaltswerte dar, die zur Beurteilung der Personensicherheit herangezogen werden können. Ferner lässt sich aus den Konzentrationen der Schadgase über das FED-Modell eine Beurteilungsgröße ableiten, die nicht abgestuft ist, sondern einen über die Zeit kontinuierlich ansteigenden Wert liefert.

Gemäß [A2.3] liegt der MVStättV ein von der MBO abweichendes Brandschutzkonzept zu Grunde, in dem eine Einteilung nach Gebäudeklassen in Abhängigkeit von der Größe der Nutzungseinheiten nicht zweckdienlich wäre. Vielmehr wird bei den Versammlungsstätten gefordert, dass die Bauteile im Hinblick auf die Belange des Brandschutzes grundsätzlich wie bei Gebäudeklasse 5 der MBO zu behandeln sind. Dies bedeutet, dass an sie dieselben Brandschutzanforderungen gestellt werden, wie bei Gebäuden mit einer Höhe von über 13 m und Nutzungseinheiten von jeweils mehr als 400 m². Damit werden die erhöhten Risiken für die Brandausbreitung und die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr berücksichtigt. In [A2.2] wird daher für tragende und aussteifende Bauteile von erdgeschossigen Versammlungsstätten eine feuerhemmende Ausführung – d. h. F 30-B unter ETK-Brand – gefordert. Nach [A2.3] lässt sich diese Anforderung in der im Anwendungsbeispiel vorgesehenen Stahlkonstruktion beispielsweise durch einen entsprechenden Schutzanstrich erfüllen. Ob bei dem zu Grunde gelegten Brandszenario eines natürlichen Brandes diese Maßnahme entfallen kann und damit letztlich auch von der Anforderung „feuerhemmend“ abgewichen werden darf, wird mit Hilfe der Ingenieurmethoden in A2.4 untersucht. Des Weiteren schreibt die MVStättV zum Erreichen der Schutzziele für das vorliegende Beispiel vor, dass das mehrgeschossige Bürogebäude feuerbeständig auszuführen ist. Als Randbedingung muss auch die Trennwand zwischen Hörsaalgebäude und Bürogebäude feuerbeständig ausgebildet werden.

A2.3 Brandszenarien und Bemessungsbrände

A2.3.1 Allgemeines

Aus Kapitel 4 des Leitfadens lassen sich zahlreiche Angaben und Möglichkeiten für die Entwicklung von Bemessungsbränden für die einzelnen Brandphasen entnehmen. Nachfolgend sollen nun exemplarisch Bemessungsbrände, wie in Bild 4.5 schematisch dargestellt, für das Anwendungsbeispiel mit Hilfe des Leitfadens entwickelt werden. Die entwickelten Zeitverläufe der Wärmefreisetzungsrate stellen die Grundlage für die Berechnung der Rauch- und Temperaturentwicklung mit einem CFD-Modell dar. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden wiederum als Eingangsgrößen für die Beurteilung der Standsicherheit des Hörsaaldachs sowie für den Nachweis der Räumung verwendet.

A2.3.2 Bemessungsbrandszenario 1 – Beurteilung der Tragkonstruktion

A2.3.2.1 Vorgehensweise

Das zu Grunde gelegte Bemessungsbrandszenario klammert eine Schwelbrandphase und das Wirksamwerden von Löschmaßnahmen aus und stellt keinen Kleinbrand mehr dar.

Im Anwendungsbeispiel wird angenommen, dass sich der Brandherd in der Mitte des Raumes in den Stuhlreihen befindet und sich das Feuer nach allen Seiten hin gleichmäßig und ungehindert ausbreitet. Diese Annahme ist damit gerechtfertigt, dass der räumliche Abstand zwischen den Reihen zu gering ist, um eine Ausbreitung des Brandes zu begrenzen. Stühle und Tische aus Holz stellen die Brandlast dar. Über Art, Lagerungsdichte und Menge der brennbaren Stoffe werden zu einem späteren Zeitpunkt noch detaillierte Angaben erfolgen.

Aufgrund der Größe des Raumes und der vermuteten Zerstörung von Fensterflächen infolge thermischer Beanspruchung kann davon ausgegangen werden, dass genügend Verbrennungsluft / Luftsauerstoff zur Verfügung steht und daher ein brandlastgesteuerter Brand vorliegt. Eine Brandmeldung an die zuständige Feuerwehr erfolgt (zunächst) nicht, da eine Brandmeldeanlage nicht vorgesehen ist und das Feuer zu einem Zeitpunkt ausbricht, zu dem sich keine Personen im Gebäude aufhalten. Dies ist etwa in der Nacht oder am Wochenende der Fall. Letzteres führt schließlich auch dazu, dass sämtliche Türen und Fenster des Hörsaals geschlossen sind. Ein Feuerwehreinsatz mit dem Wirksamwerden von Löschmaßnahmen soll in diesem Brandszenario bewusst ausgeklammert werden. Einerseits ist nicht sichergestellt, dass die zuständige Feuerwehr ohne Brandmeldeanlage und ohne die Anwesenheit von Personen rechtzeitig informiert wird und andererseits kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Einsatz der Feuerwehr unter Umständen erfolglos bleibt und sich dennoch ein Vollbrand einstellt. Der Leitfaden enthält indes in Kapitel 4 Angaben, wie sich das Wirksamwerden von Löschmaßnahmen auf ein Bemessungsbrandszenario auswirkt und wie sich dies in Form eines veränderten Verlaufs des Bemessungsbrandes beschreiben lässt.

Das Ende der Brandausbreitungsphase und in diesem Beispiel der Übergang zur Vollbrandphase tritt dann ein, wenn alle brennbaren Stoffe, d. h. die gesamte, sich im Hörsaal befindende Brandlast in das Brandgeschehen eingebunden und eine Zunahme des Brandes daher nicht mehr möglich ist.

Der Zeitverlauf der Wärmefreisetzungsrates für die Brandausbreitungsphase kann mit Hilfe von normativen Ansätzen bei geringer Bestimmtheit der Brandbedingungen entwickelt werden. Eine geringe Bestimmtheit liegt in diesem Beispiel vor, da über die Abbrandeigenschaften (v. a. Abbrandgeschwindigkeit) keine gesicherten Angaben gemacht werden können. Als Begründung hierfür sei lediglich das fehlende bzw. mangelhaft beschriebene Datenmaterial zu abbrennenden Stuhl- und Tischreihen genannt. Es müssen daher, auf der sicheren Seite liegend, pauschale Annahmen getroffen werden, wozu sich die in der internationalen Normung verwendete, amerikanische Vorgehensweise (t^2 -Ansatz) sehr gut eignet. Im Anwendungsbeispiel kann die Wärmefreisetzung-Zeitkurve für die Brandausbreitungsphase, wie nachfolgend dargestellt, ermittelt werden.

A2.3.2.2 Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers

Die erforderliche Zuverlässigkeit für die Bemessung der Konstruktion sowie für den Nachweis der Personensicherheit im Brandfall hängt von der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers in einer Nutzungseinheit eines Gebäudes und den damit verbundenen Schadensfolgen (Schäden an den Bauteilen bzw. Personen) ab.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} eines Schadenfeuers in einer brandschutztechnisch wirksam abgetrennten Nutzungseinheit mit der Grundfläche A in einem Bezugszeitraum von 1 Jahr kann mit Gl. (A2.1) ermittelt werden:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_3 \quad (\text{A2.1})$$

mit

- p_1 jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der Nutzungseinheit,
- p_{21} Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Nutzer,
- p_{22} Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr,
- p_3 Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch eine automatische Löschanlage.

Die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 von mindestens einem Entstehungsbrand in der Nutzungseinheit kann alternativ nach Gl. (A2.2) unter Annahme einer von der Grundfläche unabhängigen flächenbezogenen Brandentstehungshäufigkeit λ_1 oder nach Gl. (A2.3) unter Berücksichtigung der (meist unterproportional) mit der Größe der Nutzungseinheit wachsenden Brandentstehungshäufigkeit bestimmt werden

$$p_1 = 1 - \exp(-\lambda_1 \cdot A) \approx \lambda_1 \cdot A \quad (\text{A2.2})$$

$$p_1 = 1 - \exp(-a \cdot A^b) \approx a \cdot A^b \quad (\text{A2.3})$$

mit

- A Grundfläche der brandschutztechnisch abgetrennten Nutzungseinheit [m^2],
- λ_1 mittlere Auftretensrate von Entstehungsbränden je Quadratmeter Grundfläche und Jahr [$1/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$],
- a Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter und Jahr [$1/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$],
- b Exponent, der von der Art der Nutzung und der Unterteilung der Nutzungseinheit (Raumzellen) abhängt.

Als dritte Alternative kann vereinfacht eine durchschnittliche jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 für eine typische Größe (d. h. durchschnittliche Grundfläche) des entsprechend genutzten Bereiches verwendet werden.

Davon haben die zweite und dritte Alternative Eingang in den Nationalen Anhang zum Eurocode 1 Teil 1-2 [A2.4], dort in Anhang BB, gefunden mit den in Tabelle A2.1 wiedergegebenen Zahlenwerten.

Für die vorliegende Versammlungsstätte wird nach Tabelle A2.1 Zeile 7 p_1 angesetzt mit

$$p_1 = 2,0 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A2.4})$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_{21} berücksichtigt die Erstbekämpfung des Entstehungsbrandes durch die Nutzer, p_{22} gilt analog für die Löschmaßnahmen der alarmierten Feuerwehr. Nach englischen Brandstatistiken werden durchschnittlich 50 – 70 % der Entstehungsbrände durch

die Nutzer gelöscht (konservativ $p_{21} = 0,5$), sodass die Feuerwehr entweder gar nicht alarmiert wird oder lediglich noch Nachlöscharbeiten durchführen muss.

Tabelle A2.1 Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 von mindestens einem Entstehungsbrand je Nutzungseinheit und Jahr in Abhängigkeit von der Nutzung (nach [A2.4])

Zeile	Nutzung	Auftretenswahrscheinlichkeit je Nutzungseinheit und Jahr		
		$p_1 \approx a \cdot A^b$		p_1
		$a [1/(m^2 \cdot a)]$	b	$[1/a]$
		1	2	3
1	Wohngebäude	$4,8 \cdot 10^{-5}$	0,9	$3,0 \cdot 10^{-3}$
2	Bürogebäude	$5,9 \cdot 10^{-5}$	0,9	$6,2 \cdot 10^{-3}$
3	Krankenhaus, Pflegeheim	$7,0 \cdot 10^{-4}$	0,75	3,0E-1
4	Hotel, Beherbergungsstätte	$8,0 \cdot 10^{-5}$	1,0	$3,7 \cdot 10^{-2}$
5	Schule, Bildungseinrichtung	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,75	$4,0 \cdot 10^{-2}$
6	Verkaufsstätte, Geschäftshaus	$6,6 \cdot 10^{-5}$	1,0	$8,4 \cdot 10^{-3}$
7	öffentl. Versammlungsstätte (Theater, Kino) sonstige Versammlungsstätte (z. B. Diskothek)	$9,7 \cdot 10^{-5}$	0,75 1,0	$2,0 \cdot 10^{-2}$ $1,2 \cdot 10^{-1}$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_{22} der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr hängt einerseits von der Eingreifzeit und Leistungsfähigkeit der Feuerwehr und andererseits von der Brandausbreitung bis zum Beginn der Löscharbeiten ab. Bei öffentlichen Feuerwehren ist von einer durchschnittlichen Eingreifzeit von ca. 15 Minuten auszugehen. Bei einer Werk- oder Betriebsfeuerwehr ist die Eingreifzeit in der Regel deutlich kürzer als bei der öffentlichen Feuerwehr und ggf. die Stärke und Ausrüstung an das spezielle Objekt angepasst, sodass die Ausfallwahrscheinlichkeit p_{22} geringer anzusetzen ist. Zahlenwerte p_{22} für die Brandbekämpfung durch eine öffentliche Feuerwehr bzw. eine Werkfeuerwehr sind in Tabelle A2.2 (in Anlehnung an [A2.4]) angegeben. Zwischen den Eingreifzeiten darf linear interpoliert werden.

Für das vorliegende Beispiel wird eine Erstbekämpfung durch die Nutzer mit $p_{21} = 0,5$ sowie eine Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr mit einer Eingreifzeit von 15 min mit $p_{22} = 0,2$ angenommen. Insgesamt ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung zu

$$p_2 = p_{21} \cdot p_{22} = 0,1, \tag{A2.5}$$

was im Einklang steht mit früheren Annahmen in [A2.5], [A2.6].

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_3 einer automatischen Löschanlage hängt vom Auslegungsstandard ab. Empfohlene Zahlenwerte p_3 für verschiedene Löschanlagen können ebenfalls der Tabelle A2.2 entnommen werden.

Tabelle A2.2 Ausfallwahrscheinlichkeiten p_{21} , p_{22} und p_3 der Brandbekämpfung (in Anlehnung an [A2.4])

Brandbekämpfung durch	Ausfallwahrscheinlichkeit		
	p_{21}	p_{22}	p_3
Nutzer	0,5		
öffentliche Feuerwehr mit Eingreifzeit < 15 min > 20 min		0,2 0,5	
Werkfeuerwehr mit Eingreifzeit ¹⁾ < 10 min (vier Staffeln) < 10 min (zwei Staffeln)		0,02 0,05	
automatische Löschanlage Sprinkleranlage nach VdS/CEA-Standard 2) in anderen Fällen Sonstige Wasserlöschanlage Gaslöschanlage			0,02 0,05 0,1 0,1

¹⁾ automatische Brandmeldung und Alarmierung werden vorausgesetzt

²⁾ Planung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung nach anerkannten Regeln der Technik

Eine automatische Löschanlage ist in dem Hörsaalgebäude nicht vorhanden, daher ist

$$p_3 = 1,0. \quad (\text{A2.6})$$

Damit ergibt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers nach Gl. (A2.1) zu

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_3 = 0,02 \cdot 0,5 \cdot 0,2 \cdot 1,0 = 0,002 \quad (\text{A2.7})$$

A2.3.2.3 Erforderliche Zuverlässigkeit für die Brandschutzbemessung der Konstruktion

Nach DIN EN 1990 [A2.7] werden die verschiedenen baulichen Anlagen in Schadensfolgeklassen CC eingestuft, denen über Zuverlässigkeitsklassen RC ein erforderlicher Zuverlässigkeitsindex β und eine Versagenswahrscheinlichkeit p_f zugeordnet werden, jeweils bezogen auf 1 Jahr. Diese Werte gelten grundsätzlich für alle Lastfälle einschließlich der außergewöhnlichen Lastfälle wie Brand. Der Zuverlässigkeitsindex β und die Versagenswahrscheinlichkeit p_f sind verknüpft über die Funktion $\Phi(\cdot)$ der Standard-Normalverteilung

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (\text{A2.8})$$

Für die außergewöhnliche Situation eines Brandes können aus der Versagenswahrscheinlichkeit p_f und der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem Schadenfeuer in der betreffenden Nutzungseinheit eine bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ im Brandfall und der damit verknüpfte Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wie folgt bestimmt werden

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \quad (A2.9)$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1-p_{f,fi}) \quad (A2.10)$$

Dabei ist Φ^{-1} die Umkehrfunktion der Standard-Normalverteilung.

Im Nationalen Anhang [A2.4], Anhang BB, werden für Grenzzustände der Tragfähigkeit im Brandfall nutzungsspezifisch die Zuverlässigkeitsindizes β und Versagenswahrscheinlichkeiten p_f in Abhängigkeit von den zu erwartenden Schadensfolgen nach Tabelle A2.3 vorgegeben.

Tabelle A2.3 Richtwerte für den Zuverlässigkeitsindex β und die zugehörige Versagenswahrscheinlichkeit p_f (Bezugszeitraum 1 Jahr) zur brandschutztechnischen Bemessung der Konstruktion bei verschiedenen Nutzungen (nach [A2.4])

Zeile	Nutzung	Schadensfolgen					
		hoch		mittel		Gering	
		β	p_f	β	p_f	β	p_f
		1a	1b	2a	2b	3a	3b
1	Wohngebäude, Bürogebäude und vergleichbare Nutzungen <i>Gebäudeklassen nach MBO</i>	4,7	$1,3 \cdot 10^{-6}$	4,2	$1,3 \cdot 10^{-5}$	3,7	$1,1 \cdot 10^{-4}$
					4 + 5		2 + 3
2	Krankenhaus, Pflegeheim						
3	Beherbergungsstätte, Hotel						
4	Schule	5,2	$1,0 \cdot 10^{-7}$	4,7	$1,3 \cdot 10^{-6}$	4,2	$1,3 \cdot 10^{-5}$
5	Verkaufsstätte						
6	Versammlungsstätte						
7	Hochhaus						
8	Landwirtschaftlich genutzte Gebäude	--	--	4,2	$1,3 \cdot 10^{-5}$	3,7	$1,1 \cdot 10^{-4}$

Für das Hörsaalgebäude als Versammlungsstätte gilt bei Voraussetzung mittlerer Schadensfolgen (Sicherheitsindex $\beta = 4,7$) für das Haupttragwerk

$$p_f = 1,3 \cdot 10^{-6} \quad (\text{A2.11})$$

Damit errechnen sich die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und der Zuverlässigkeitsindex β_{fi} für die Bemessung im Brandfall wie folgt:

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-6}}{2,0 \cdot 10^{-3}} = 6,5 \cdot 10^{-4} \quad (\text{A2.12})$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1-p_{f,fi}) = \Phi^{-1}(1-6,5 \cdot 10^{-4}) = 3,22 \quad (\text{A2.13})$$

A2.3.2.4 Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandschutzbemessung der Konstruktion

Umfangreiche wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchungen in [A2.8] haben gezeigt, dass die Brandlastdichte q aufgrund ihrer großen Streuungen maßgebenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit im Brandfall hat. Die nächstwichtigere Rolle spielt die maximale Wärmefreisetzungsrates \dot{Q}_{\max} (HRR) in der Phase des vollentwickelten Brandes.

Es wird davon ausgegangen, dass für diese beiden Einflussgrößen der Brandeinwirkung jeweils 90 %-Quantile als charakteristische Werte definiert bzw. individuell ermittelt werden. Für die Bemessung werden Bemessungswerte eingesetzt, die sich aus den charakteristischen Werten durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_{fi} errechnen. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden so festgelegt, dass die erforderliche Zuverlässigkeit nach Tabelle A2.3 im Mittel über alle Bauteile und Bemessungssituationen eingehalten und in der Regel um höchstens $\pm\Delta\beta_{fi} = 0,5$ unter- oder überschritten wird [A2.7].

Setzt man (nach internationalen Statistiken) für die Brandlastdichte und die Wärmefreisetzungsrates eine Gumbel-Verteilung voraus, dann können die Teilsicherheitsbeiwerte mit Gl. (A2.14) als Quotient aus dem Bemessungswert im Brandfall und dem charakteristischem Wert berechnet werden:

$$\gamma_{fi} = \frac{1 - V \cdot \sqrt{6} / \pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(\Phi(\alpha \cdot \beta_{fi})))]}{1 - V \cdot \sqrt{6} / \pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(0,9))]} \quad (\text{A2.14})$$

Wird die Brandlastdichte q pauschal für eine Nutzung aus einer entsprechenden Tabelle in [A2.4] entnommen, werden der Variationskoeffizient zu $V_q = 0,3$ und der Sensitivitätsfaktor zu $\alpha = 0,6$ angenommen. Für die maximale Wärmefreisetzungsrates \dot{Q}_{\max} beträgt der Variationskoeffizient $V_Q = 0,2$ und der Sensitivitätsfaktor $\alpha = 0,5$. Wird die Brandlastdichte im Einzelfall ermittelt (wie z. B. im Industriebau üblich), sind die zufälligen Streuungen kleiner. Dann kann der Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} mit dem Variationskoeffizienten $V_q = 0,2$ und dem Sensitivitätsfaktor $\alpha = 0,5$ berechnet werden.

Die so ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte γ_{fi} für die Brandlastdichte und die Wärmefreisetzungsrates können aus Bild A2.5 in Abhängigkeit vom erforderlichen Zuverlässigkeitsindex β_{fi} abgelesen werden.

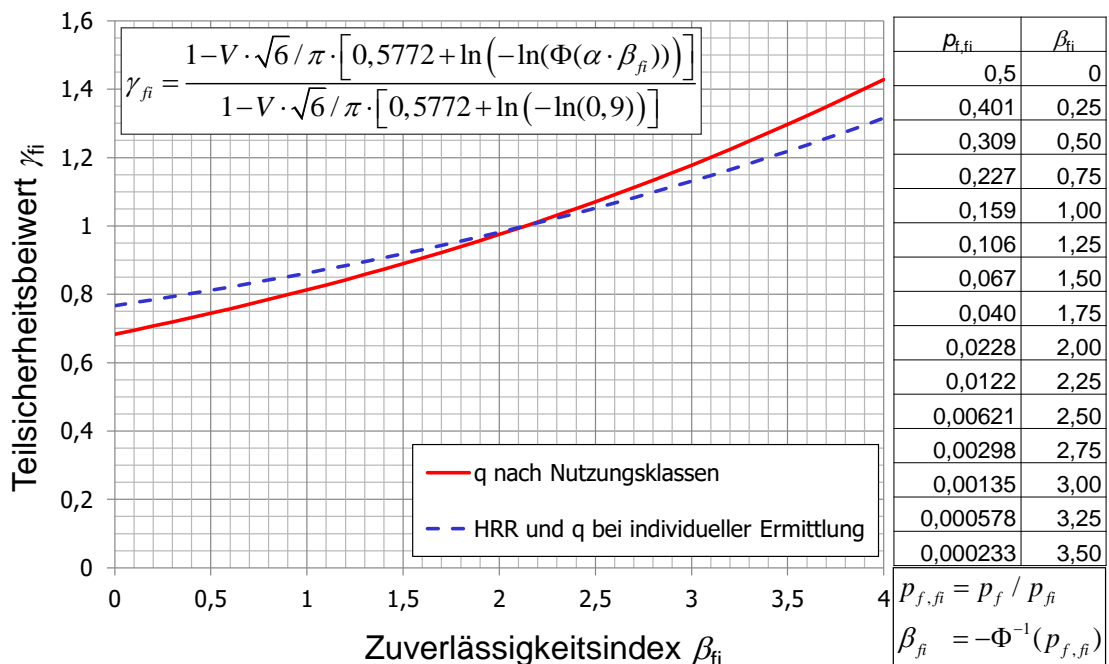


Bild A2.5 Teilsicherheitsbeiwerte für die Einflussgrößen eines Naturbrandes bezogen auf die definierten charakteristischen Werte (90 %-Quantil)

Mit $\beta_{fi} = 3,22$ nach Gl. (A2.13) erhält man aus Bild A2.5

$$\gamma_{fi,q} = 1,24 \quad \text{für } q \text{ bei Ermittlung nach Nutzungsklassen} \quad (\text{A2.15a})$$

$$\gamma_{fi,HRR} = 1,19 \quad \text{für HRR und für } q \text{ bei individueller Ermittlung} \quad (\text{A2.15b})$$

Der Wert für die Wärmefreisetzungsrate \dot{Q}_{max} (HRR) gilt auch für die Brandlastdichte q , die für das Hörsaalgebäude individuell ermittelt werden soll.

A2.3.2.5 Bemessungsbrand für die Tragwerksbemessung

Nach Kapitel 4 des Leitfadens sind folgende Angaben relevant:

- Ein $\alpha \cdot t^2$ -Ansatz wird für die Brandentwicklungsphase gewählt, um den kritischsten Fall mit abzudecken.
- Der Brandherd befindet sich im mittleren Sitzbereich des Hörsaals (s. Bild A2.6).
- Es erfolgt eine schnelle Brandausbreitung ($\alpha = 0,04689$) über die gesamten Stuhl- und Tischreihen aus Holz.
- Teilbereiche der Fensterscheiben versagen ab 300 °C.

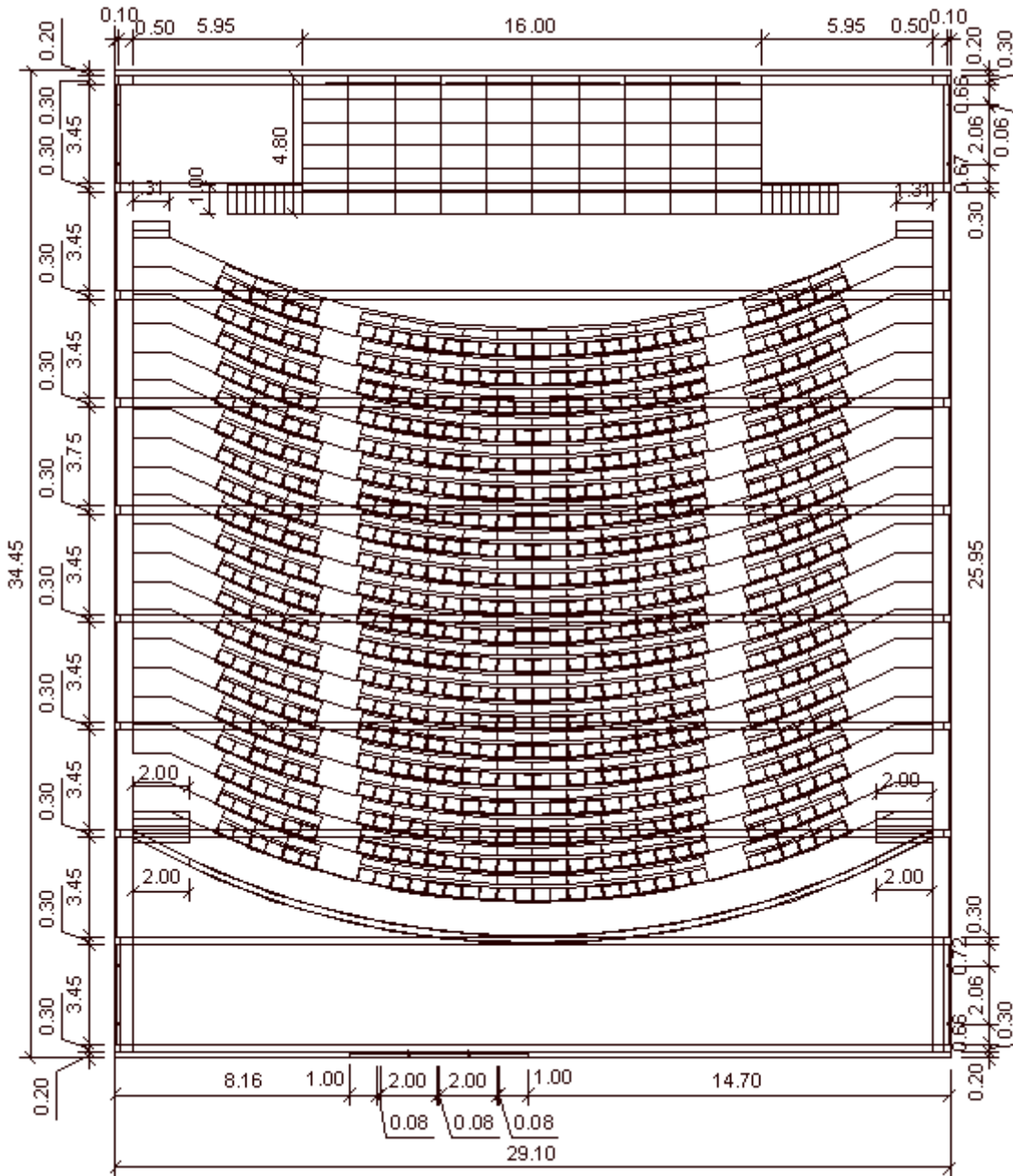


Bild A2.6 Grundriss des Hörsaalgebäudes

Zur Ermittlung der relevanten Bemessungswerte der Brandlastdichte q und der maximalen flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate \dot{q} werden folgende Überlegungen zu Grunde gelegt. Die Stuhl- und Tischreihen aus Holz stellen die zu berücksichtigende Brandlast dar, die auf einer Fläche von etwa $20,0 \text{ m} \times 20,0 \text{ m} = 400 \text{ m}^2$ angeordnet sind (vgl. Bild 9). Werden hiervon etwa 30 % für die vorhandenen Zwischenräume zwischen Stuhl und Tisch bzw. zwischen den einzelnen Sitzreihen abgezogen, ergibt sich die gesamte Brandfläche A_F zu

$$A_F = 0,70 \cdot 400 \text{ m}^2 = 280 \text{ m}^2 \quad (\text{A2.16})$$

Die Grundfläche A des Hörsaals errechnet sich zu

$$A = 28,9 \text{ m} \cdot 34,0 \text{ m} \approx 1.000 \text{ m}^2 \quad (\text{A2.17})$$

Anhang 2 Anwendungsbeispiel

Bei einer Dichte des Holzes von etwa 500 kg/m^3 und einer angenommenen Gesamtdicke aller Holzteile (Sitzfläche, Tischfläche, Lehne, usw.) von 12,5 cm beträgt demnach die brennbare Masse

$$M_F = 500 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,125 \text{ m} \cdot 280 \text{ m}^2 = 17.500 \text{ kg} \quad (\text{A2.18})$$

Der untere Heizwert von Holz (Möbel) kann (nach Tabellen A4.1 des Leitfadens für Schule/Klassenräume) mit $H_i = 18,2 \text{ MJ/kg}$ angenommen werden. Die gesamte Brandlast ergibt sich zu

$$Q_{\max} = 17.500 \text{ kg} \cdot 18,2 \text{ MJ/kg} = 318.500 \text{ MJ} \approx 319 \text{ GJ} \quad (\text{A2.19})$$

Der charakteristische Wert der mittleren Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche beträgt demnach

$$q_{f,k} = Q_{\max} / A = 319.000 \text{ MJ} / 1.000 \text{ m}^2 = 319 \text{ MJ/m}^2 \quad (\text{A2.20})$$

Der Bemessungswert der Brandlastdichte ist definiert als:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot \chi \cdot \gamma_{fi,q} \quad \text{in MJ/m}^2 \quad (\text{A2.21})$$

Dabei ist:

$q_{f,k}$ die charakteristische Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche in MJ/m^2 ,

γ_{fi} ein Teilsicherheitsbeiwert, der die Auftretenswahrscheinlichkeit eines vollentwickelten Brandes in der Nutzungseinheit sowie die erforderliche Zuverlässigkeit der Bauteile berücksichtigt,

χ die Verbrennungseffektivität, die in der Regel die unvollständige Verbrennung pauschal berücksichtigt; für feste Brandlasten darf $\chi = 0,8$ angenommen werden.

Mit den entsprechenden Werten und unter Berücksichtigung des Eingangs erwähnten Teilsicherheitsbeiwertes von $\gamma_{fi,HRR} \approx 1,19$ aus Gl. (A2.15b) ergibt sich aus (A2.21) der Bemessungswert der auf die Grundfläche des Hörsaals bezogenen, mittleren Brandlastdichte für das Anwendungsbeispiel zu

$$q_{f,d} = 319 \cdot 0,8 \cdot 1,19 = 304 \text{ MJ/m}^2 \quad (\text{A2.22})$$

bzw. der Bemessungswert der gesamten Brandlast zu

$$Q_{f,d} = 304 \cdot 1.000 = 304 \text{ GJ} \quad (\text{A2.23})$$

Vergleicht man diesen Wert mit den 90 %-Fraktile der Brandlastdichten bei unterschiedlichen Nutzungen, wäre für die pauschalierte Annahme der Brandlastdichte der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi} = 1,24$ anzusetzen.

Es zeigt sich damit, dass der individuell ermittelte Wert $q_{f,k}$ bei Annahme einer identischen Verteilung mit einem identischen Variationskoeffizienten zwischen den in Tabelle A4.1 des Leitfadens angegebenen Werten für Theater/Kino und für Hörsäle liegt:

$$1,24 \cdot 0,8 \cdot 417 \text{ MJ/m}^2 = 413 \text{ MJ/m}^2 > q_{f,d} > 1,24 \cdot 0,8 \cdot 195 \text{ MJ/m}^2 = 193 \text{ MJ/m}^2$$

Dies kann als gute Übereinstimmung und Bestätigung angesehen werden.

Zur Bestimmung der maximalen Wärmefreisetzungsrates und der Geschwindigkeit, mit der sich der Brand entwickelt, werden gestapelte Holzpaletten als äquivalente Brandlast zu Grunde

gelegt. Die Tabelle A4.2 des Leitfadens enthält die hierfür benötigten Angaben. Als realistische Annahme der äquivalenten Brandlast wird eine Stapelung von maximal zwei Holzpaletten betrachtet. In Verbindung mit dem Teilsicherheitsbeiwert nach Gl. (A2.15b) $\gamma_{fi,HRR} \approx 1,19$ ergibt sich die maximale flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate zu

$$\dot{q} = (2 \cdot 0,14 \text{ m}) / 0,5 \text{ m} \cdot 1.249 \text{ kW/m}^2 \cdot 1,19 = 832 \text{ kW/m}^2 \quad (\text{A2.24})$$

Dieser Wert kann wiederum mit Tabellenwerten zur maximalen flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate für verschiedene Brandlastanordnungen verglichen werden. Demnach erhält man für waagrecht gelagertes Holz / PMMA, bei dem die obere Fläche des Stapels brennt,

$$\dot{q} = 0,720 \text{ MW/m}^2 \cdot 1,19 = 0,8576 \text{ MW/m}^2,$$

so dass auch hier die realistische Annahme mit Erfahrungswerten auf experimenteller Basis übereinstimmt.

Um letztlich die maximale Wärmefreisetzungsrate auf der Brandfläche zu bestimmen, muss der flächenspezifische Wert \dot{q} mit der Brandfläche A_F multipliziert werden. Die maximale Wärmefreisetzungsrate ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_{\max} = 0,832 \text{ MW / m}^2 \cdot 280 \text{ m}^2 = 233 \text{ MW} . \quad (\text{A2.25})$$

Zum Vergleich: Tabelle A4.1 gibt beispielsweise für eine Büronutzung (ohne Sprinkleranlage) eine flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate von 250 kW/m^2 an. Daraus ergibt sich bei 1.000 m^2 Grundfläche des Hörsaals eine nutzungsbezogene maximale Wärmefreisetzungsrate von

$$\dot{Q}_{\max} = 1,19 \cdot 250 \text{ MW} = 297,5 \text{ MW} .$$

Bild A2.7 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate des Bemessungsbrandes als Ergebnis der Untersuchung, wie sie entsprechend der Angaben ausgewertet wurde.

Darüber hinaus werden auf Grundlage des Modells unterschiedliche Zu- und Abluftsituationen kontrolliert und abgeschätzt, die sich ergeben, wenn das Versagen von Fensterscheiben durch die Einwirkung des Brandes berücksichtigt wird.

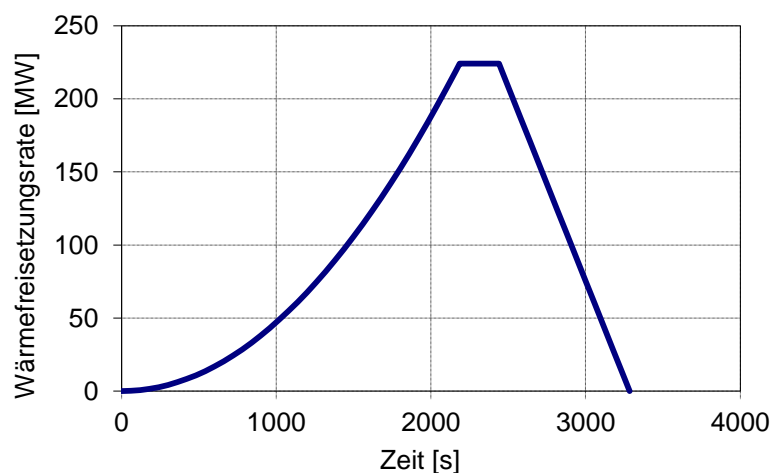


Bild A2.7 Bemessungsbrand Tragkonstruktion Hörsaal, Verlauf der Wärmefreisetzungsrate [MW]

A2.3.3 Bemessungsbrandszenario 2 – Beurteilung der Räumung des Hörsaals

A2.3.3.1 Vorgehensweise

Zur Beurteilung der Personensicherheit bzw. -rettung der Besucher im Hörsaal ist ein vom vorherigen Bemessungsbrandszenario unterschiedliches Szenario zu wählen, da dort u. a. vorausgesetzt wurde, dass sich zum Zeitpunkt des Brandes keine Personen im Gebäude aufhalten. Zudem ist davon auszugehen, dass bei Anwesenheit von Personen im Gebäude zumindest eine Brandmeldung an die Feuerwehr erfolgen wird, sodass ein Wirksamwerden von Löschmaßnahmen wahrscheinlich ist. Da der Zeitpunkt des Löscheinsatzes der Feuerwehr nicht genau festzulegen ist, wird für die Räumung konservativ von 15 Minuten nach Brandbeginn ausgegangen. Innerhalb dieser Zeitspanne entwickelt sich der Brand aufgrund der ansonsten unveränderten Rahmenbedingungen entsprechend dem vorherigen Bemessungsbrand. Es wird weiterhin unterstellt, dass der Brand während einer Großveranstaltung ausbricht, zu der etwa 1.000 Besucher in dem eigentlich nur für 640 Besucher ausgelegten Hörsaal anwesend sind.

A2.3.3.2 Erforderliche Zuverlässigkeit für den Nachweis der Räumung im Brandfall

Analog zum Nachweis der Tragfähigkeit der Konstruktion im Brandfall ist auch beim Nachweis, dass die Flucht der Personen aus der vom Brand betroffenen Nutzungseinheit vor dem Überschreiten von Grenzwerten der Brandwirkungen abgeschlossen werden kann, eine erforderliche Zuverlässigkeit einzuhalten. Diese ergibt sich wiederum aus einer für alle Lastfälle geltenden, von den Schadensfolgen abhängigen Versagenswahrscheinlichkeit p_f und der Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} des für die Räumung maßgebenden Brandszenarios gemäß Gl. (A2.1).

Bei der Versagenswahrscheinlichkeit p_f ist zu unterscheiden, ob die Flucht aus der betroffenen Nutzungseinheit durch die Brandwirkungen verhindert oder „nur“ behindert wird.

Eine Verhinderung der Flucht z. B. durch die toxische Wirkung der Brandgase bedeutet eine konkrete Gefahr für die Nutzer, die mit derjenigen bei einem brandbedingten Versagen baulicher Brandschutzmaßnahmen vergleichbar ist. Damit kann p_f im Prinzip aus Tabelle A2.3 entnommen werden. Für den Hörsaal als Versammlungsstätte erhält man bei mittleren Schadensfolgen wie in Gl. (A2.11) $p_f = 1,3 \cdot 10^{-6}$ [1/a]. Im vorliegenden Fall sind angesichts der sehr konservativen Vorgabe des Leistungskriteriums $FED \leq 0,3$ relativ geringe Schadensfolgen zu erwarten, sodass $p_f = 1,3 \cdot 10^{-5}$ akzeptabel erscheint.

Damit können die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und der Zuverlässigkeitsindex β_{fi} für den Nachweis der Räumung im Brandfall analog zu Gln. (A2.12) und (A2.13) berechnet werden.

Bei der Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} des maßgebenden Brandszenarios für die Räumung in der Frühphase des Brandes gemäß Gl. (A2.1) darf aber in der Regel nur die Erstbekämpfung des Brandes durch die Nutzer in Ansatz gebracht werden, während Löschmaßnahmen der Feuerwehr zu diesem Zeitpunkt noch nicht wirksam sind ($p_{22} = 1,0$). Somit ergibt sich für den Hörsaal

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_3 = 0,02 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,01 \quad (\text{A2.26})$$

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-5}}{1,0 \cdot 10^{-2}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{A2.27})$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) = \Phi^{-1}(1 - 1,3 \cdot 10^{-3}) = 3,01 \quad (\text{A2.28})$$

Ist nur eine Behinderung der Flucht z. B. durch Unterschreiten einer geforderten Mindesthöhe der raucharmen Schicht oder einer Mindesterkennungsweite infolge Rauch zu erwarten, kann wegen der deutlich geringeren Schadensfolgen eine höhere Versagenswahrscheinlichkeit in Kauf genommen werden. In Kapitel 10 des Leitfadens wird für diesen Fall eine maximal zulässige Versagenswahrscheinlichkeit von $p_f = 1,9 \cdot 10^{-3}$ [1/a] empfohlen mit einer Bandbreite von max. $p_f = 8,2 \cdot 10^{-3}$ bis min. $p_f = 3,4 \cdot 10^{-4}$.

Mit der Auftretenswahrscheinlichkeit des maßgebenden Brandszenarios nach Gl. (A2.27) ergibt sich dann

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1,9 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 10^{-2}} = 1,9 \cdot 10^{-1} \quad (\text{A2.29})$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) = \Phi^{-1}(1 - 1,9 \cdot 10^{-1}) = 0,88 \quad (\text{A2.30})$$

A2.3.3.3 Sicherheitsbeiwerte für den Nachweis der Räumung im Brandfall

In Kapitel 10 des Leitfadens werden für die Räumung im Brandfall exemplarisch ein Nachweis auf Basis der Leistungskriterien „raucharme Schichthöhe $\geq 2,5$ m“ bzw. „optische Dichte $\leq 0,1$ 1/m (stellvertretend für eine Behinderung der Flucht) und ein Nachweis auf Basis des Leistungskriteriums „FED-Wert $\leq 0,3$ “ (für eine Verhinderung der Flucht) untersucht. Eine Zuverlässigkeitsanalyse lieferte die in Bild 10.6 und Bild 10.8 in Kapitel 10 dargestellten Anteile der Einflussgrößen an der resultierenden Varianz der Grenzzustandsgleichung $Z = t_{\text{verfügbar}} - t_{\text{Räumung}}$. Dominierend ist in beiden Fällen die Brandentwicklungszeit t_α (= Zeit bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzungsrate von 1 MW). Hierfür ist ein Bemessungswert oder alternativ ein charakteristischer Wert in Verbindung mit einem Teilsicherheitsbeiwert so zu bestimmen, dass die geforderte Zuverlässigkeit gemäß Gl. (A2.28) oder (A2.30) eingehalten wird.

Wenn die Brandentwicklungszeit als lognormal angenommen wird mit einem Variationskoeffizient $V_{t_\alpha} = 0,2$ und der charakteristische Wert $t_{\alpha,k}$ (z. B. 150 s für die Versammlungsstätte) etwa 50 s niedriger als der Mittelwert definiert ist, wird bei konservativer Vorgabe der Premovementzeit kein zusätzlicher Teilsicherheitsbeiwert benötigt, um die erforderliche Zuverlässigkeit nach Gl. (A2.30) beim Nachweis der raucharmen Schicht oder der Erkennungsweite sicherzustellen. Für den Nachweis des FED-Wertes muss dann der charakteristische Wert $t_{\alpha,k}$ noch durch einen Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi} = 1,4$ dividiert werden, um die höhere Zuverlässigkeit nach Gl. (A2.28) zu erreichen. In diesem Fall ist auch die maximale Personenzahl in der Versammlungsstätte konservativ vorzugeben (im Hörsaalbeispiel mit max. 1000 Personen).

A2.3.3.4 Bemessungsbrand für den Nachweis der Räumung

Für die Leistungskriterien „raucharme Schichthöhe $\geq 2,5 \text{ m}$ “ bzw. „optische Dichte $\leq 0,11/\text{m}^2$ “ entspricht die Wärmefreisetzungs-Zeitkurve für die ersten 900 s (15 min) einem α - t^2 -Verlauf, wobei nach 150 s 1 MW Wärmefreisetzung durchlaufen wird. Nach der 15-minütigen ungehinderten Brandentwicklung, d. h. mit Beginn der Löschmaßnahmen, verläuft die Wärmefreisetzungsrate auf einem konstanten Niveau, was einer Beherrschung des Brandes gemäß Bild 4.9 entspricht, und klingt nach einer Branddauer von etwa 26 Minuten ab, bis der Brand vollständig gelöscht ist. Den Verlauf dieses Bemessungsbrandes für die Beurteilung der Räumung des Hörsaals über alle Brandphasen hinweg zeigt Bild A2.8.

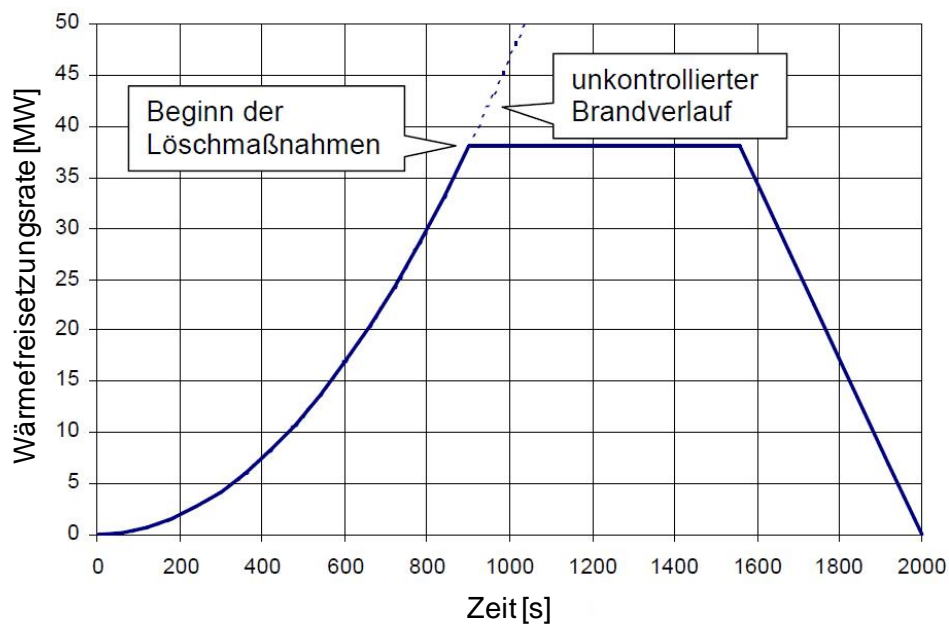


Bild A2.8 Bemessungsbrand für die Beurteilung der Räumung des Hörsaals

Für das Leistungskriterium „FED $\leq 0,3$ “ entspricht die Wärmefreisetzungsrates für die ersten 900 s (15 min) einem α - t^2 -Verlauf, wobei nach $150 \text{ s} / 1,4 = 107 \text{ s}$ 1 MW Wärmefreisetzung durchlaufen wird.

Als konservativer Ort der Brandentstehung wurde die vordere Sitzreihe gewählt, weil hier von allen Seiten Zuluft in den Rauchgasplume eingemischt werden kann und maximale Steighöhen erreicht werden, so dass der Rauchmassenstrom und die resultierende Verrauchung maximal sind.

A2.4 Ermittlung der Brandwirkungen für die Tragwerksbemessung

A2.4.1 Fragestellungen

Vorgegeben ist das zuvor ermittelte Brandszenario für die Beurteilung der Dachtragkonstruktion des Hörsaals. Die zugehörigen Brandwirkungen sollen für die brandschutztechnische Bemessung der Stahlkonstruktion herangezogen werden.

Im Hinblick auf die Bauteilbemessung werden acht Rahmen in Stahlbauweise bestehend aus Stützen und Riegeln im Hörsaal betrachtet. Folgende Überlegungen sollen in den Parameterstudien für die Bauteilauslegung berücksichtigt werden:

- Rauchabzugsflächen im oberen Bereich der Fensterfront an den Längsseiten des Hörsaals: 3,4 % der Grundfläche (Vorgabe nach MVStättV [A2.2]: mind. 2 %),
- Entsprechende Zuluftflächen im unteren Bereich der Halle, jeweils unterhalb der Rauchabzugsflächen angeordnet,
- Die Rauchabzugs- und Zuluftflächen werden 2 Minuten nach Brandbeginn geöffnet,
- Die Verbindungstür zum Atriumgebäude (Brandabschnitt) im oberen Bereich des Hörsaals ist bei der Betrachtung der Bauteilauslegung in jedem Fall geschlossen, was auch dem kritischeren Fall für die Entwicklung der Temperaturen bei einem Brand im Hörsaal entspricht,
- Ein Angriff der Feuerwehr erfolgt nach 10 Minuten und führt zur Öffnung einer der unteren Fluchtwegetüren. Ein Angriff mit Löschwasser wird aber im Verlauf der vorgegeben Wärmefreisetzungsrate nicht berücksichtigt, was als ungünstigster Fall angesehen werden kann.

A2.4.2 Auswahl des Modelltyp

Die Auswahl des Modelltyps ist direkt mit der Fragestellung verknüpft. Immer wenn Ergebnisse mit hoher räumlicher Genauigkeit gefragt sind (z. B. zur weiteren Bauteilbemessung) und insbesondere wenn die Ergebnisse von den Strömungsbedingungen im Raum abhängen, sind CFD-Modelle den Zonenmodellen vorzuziehen, auch wenn deren Einsatz mit größerem Aufwand verbunden ist.

Für die Berechnung der am Bauteil vorliegenden Rauchgastemperaturen wurde der Fire Dynamics Simulator in der Version 6 [A2.10]) gewählt. Das Modell FDS wird regelmäßig einer Validierung durch das NIST (National Institute of Standards and Technology) unterzogen [A2.11].

Das Modell eignet sich auch für weitere Fragestellungen, z. B. zur Berechnung der Rauchausbreitung und zur Berechnung der Höhe der rauchgasarmen Schicht, wie sie für die Personenrettung bzw. Räumung betrachtet werden.

Bei der Erstellung des Modells für die Berechnung mit FDS, wurden folgende generelle Annahmen für die Geometrie und die Umfassungsbauteile gemacht:

Für die Bauteilberechnung wurde von einer geschlossenen Verbindungstür zum anschließenden Atrium ausgegangen. Bild A2.9 zeigt das Modell des Hörsaals für die Berechnung mit FDS Version 6.

- Alle geometrischen Angaben wurden in einem Raster mit der Genauigkeit von 50 cm berücksichtigt. Die Binder haben Querschnitte von 50/100 cm, die Stützen Querschnitte von 50/50 cm.

Anhang 2 Anwendungsbeispiel

- Die Wände an der oberen und unteren Stirnseite, die Decke und der Boden wurden mit thermophysikalischen Daten entsprechend einem gedämmten Normalbeton gerechnet.
- Für die Stirnseiten des Hörsaals (Fensterfronten) wurde ein thermisch „dünnes“ Material mit den Eigenschaften von Glas angenommen.
- Die Sitzreihen wurden durch 5 Stufen à 4 m Breite angenähert, die obere Plattform (Zugang über Atrium) hat eine Höhe von 3,5 m, die Brandlast wurde auf einer Fläche von 280 m² angenommen, die sich auf diese 5 Stufen gleichmäßig verteilt.
- Der Außenraum des Hörsaals wird umlaufend berücksichtigt.
- Um Berechnungsfehler an Gittergrenzen auszuschließen, wird nur ein (globales) Berechnungsgitter in FDS verwendet (siehe Bild A2.9)

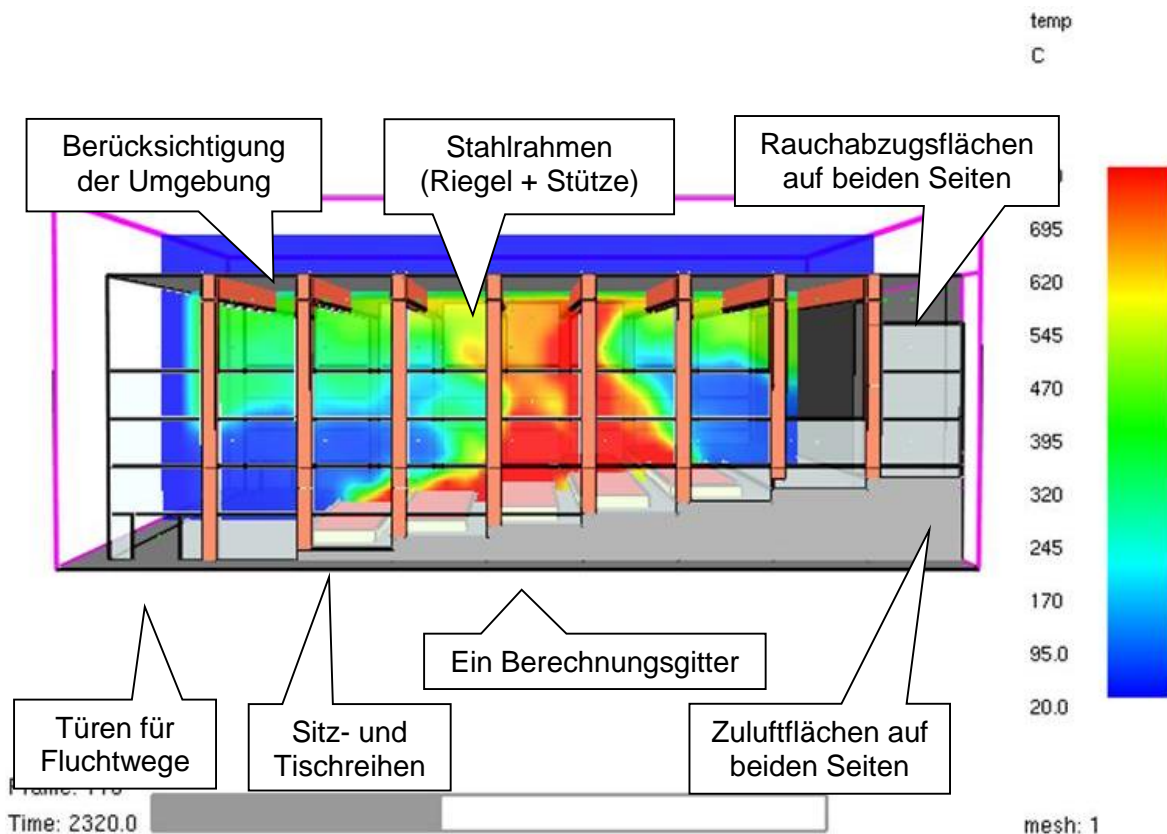


Bild A2.9 Modell des Hörsaals für die Berechnung mit FDS Version 6, dargestellt mit Smokeview, Darstellung mit Außenraum außerhalb des Hörsaals

Im Hinblick auf die weitere Bauteilbemessung wurden relevante Messpunkte festgelegt, an denen die Gastemperaturen im Bereich der Binder alle 10 Sekunden in eine Datei gespeichert wurden.

Bild A2.1 zeigt diese Messpunkte exemplarisch für einen der 8 Dachbinder.

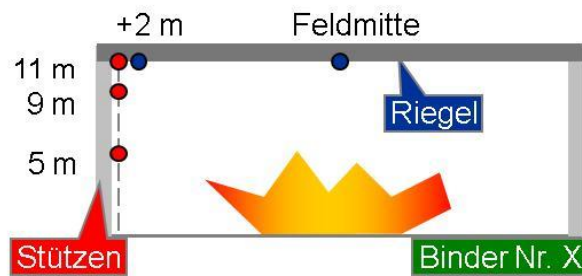


Bild A2.1 Systemskizze, Bezeichnung der Messstellen für die Gastemperaturen des Systems der Binder (Stützen + Riegel)

A2.4.3 Durchgeführte Berechnungen

Es wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

Typ A: $\alpha \cdot t^2$ Ansatz, keine Berücksichtigung des Versagens von Fenstern

Typ B: Brandausbreitung über Stuhlreihen

Typ C: wie Typ A, aber Berücksichtigung des Versagens von Fenstern

Für den Fall B wurde eine schnelle Brandausbreitung von 100 cm/min angesetzt (Leitfaden, Tabelle 4.2). Eine Ausbreitung über die Mittellachse der unteren Sitzreihe (20 m) nach oben dauert daher 20 Minuten.

Auf Grundlage der Überlegungen aus Kapitel 5.6.2 „Wahl der Gitterauflösung“ ist bei einem Brand mit 233 MW eine Gitterauflösung im Bereich von 25 cm bereits vergleichsweise sehr gut. Tatsache ist aber, dass die Wärmefreisetzungsrate gerade am Beginn des Brandes erst von kleineren Werten ansteigt und daher die Gitterauflösung fortlaufend angepasst werden müsste. Dies ist mit dem Modell FDS so nicht möglich, so dass für die Berechnung die Gitterauflösung auch für kleinere Wärmefreisetzungsraten geeignet sein sollte. Hierbei ergeben sich für kleinere Wärmefreisetzungsraten auch feinere Auflösungen um ein Brand adäquat auflösen zu können. Für eine charakteristische Gitterauflösung von mindestens $R^*=4$ sind Brände mit mindestens 1 MW Leistung bereits für Gitter mit 25 cm ausreichend aufgelöst.

Die Rechenläufe mit unterschiedlichen Parametern sind in Tabelle A2.4 nach [A2.12] zusammengefasst. Grundlage war eine Analyse der Abhängigkeit der Ergebnisse von der Zellfeinheit, die zu guten Ergebnissen bei der Verwendung von Gitterzellen mit 50 cm Kantenlänge führen. Insgesamt wird eine Feinheit der Zellen von bis zu 25 cm als sinnvoll betrachtet.

Tabelle A2.4 Überblick Modellierung Parameterstudie, gewählte Parameter

Bezeichnung Modelllauf	A_50	A_25_50	A_25	B_50	C_50	C_50_T
Zellengröße, Einheit [cm]	50*50*50	25*25*50	25*25*25	50*50*50	50*50*50	50*50*50
Anzahl Zellen	77.792	311.168	622.336	77.792	77.792	77.792
Brandherd und Ausbreitung im Bereich der Sitzreihen	Mitte, quad. Ansatz, Alpha=schnell	Mitte, quad. Ansatz, Alpha=schnell	Mitte, quad. Ansatz, Alpha=schnell	Unten, 1m/min über 5 Bereiche à 4 m	Mitte, quad. Ansatz, Alpha=schnell	Mitte, quad. Ansatz, Alpha=schnell
Fenster versagen bei 300 °C	nein	nein	nein	nein	ja	ja
Zu- und Abluft	2 Minute	2 Minute	2 Minute	2 Minute	2 Minute	2 Minute
untere Fluchttür offen	nein	nein	nein	nein	nein	10. Minute

*) Schrift kursiv: Änderungen gegenüber Grundvariante A_50

A2.4.4 Ausgewählte Ergebnisse

Als Ergebnis der Berechnungen wird auszugsweise in Bild A2.11 der Verlauf der Gastemperaturen im Bereich des Riegels 4 (R_4) in Feldmitte gezeigt.

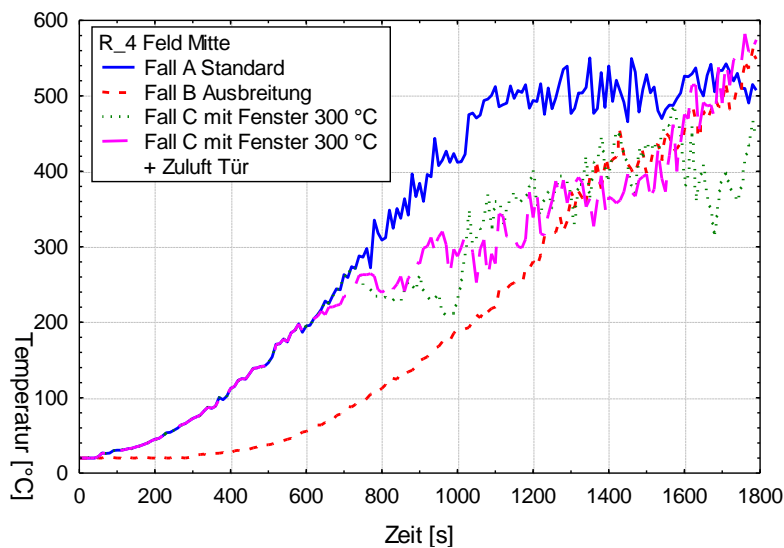


Bild A2.11 Verlauf der Temperatur am Riegel 4 in Feldmitte für 4 verschiedene Brandszenarien

Bleibt die untere Fluchttür geschlossen, liegen die höchsten Temperaturen im Bereich der Riegel 2 und 3. Im Falle der geöffneten Fluchttür (durch Eingreifen der Feuerwehr nach 10 Minuten) sind die Temperaturen im Bereich der Binder 4 und 5 am höchsten.

Der Einfluss der zusätzlichen Zuluftflächen durch „herausfallende“ Fensterscheiben ab der 800. Sekunde ist deutlich zu erkennen, er führt zuerst zu einem Plateau bei der Temperaturentwicklung. Ab der 1000. Sekunde steigen die Temperaturen aber wieder deutlich an, da die Wärmefreisetzungsrate weiterhin deutlich ansteigt.

Bild A2.12 zeigt den Verlauf der Temperaturen im Bereich des Riegels 3 und an den Stützen 3 für den Fall C mit einer Zellengröße von $25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$ für 90 Minuten Berechnungszeit. In Feldmitte werden am Riegel 3 Temperaturen bis knapp über 800 °C berechnet. Die Temperaturen an den Stützen liegen über den gesamten betrachteten Zeitraum unterhalb der Werte, die in Feldmitte unterhalb der Decke berechnet wurden.

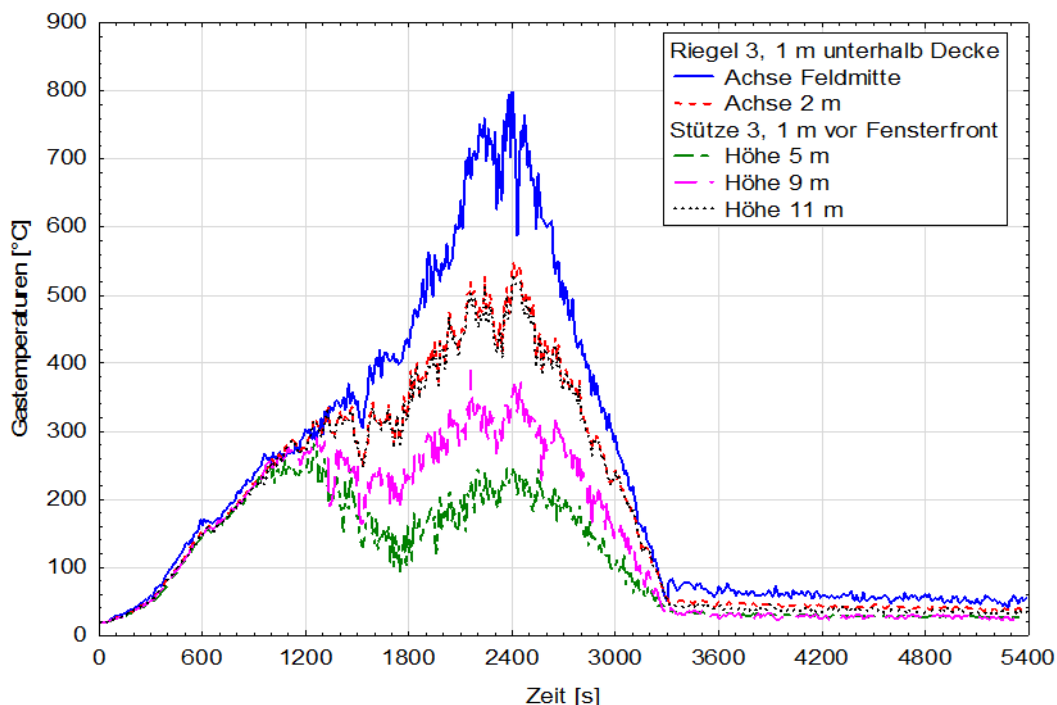


Bild A2.12 Temperaturverlauf an dem Riegel und den Stützen 3 an verschiedenen Messstellen (siehe Bild A2.12) für den Fall C_25), 1 m unterhalb der Decke, Mittelachse für 90 Minuten Berechnungszeit

A2.4.5 Fazit zur Ermittlung der Brandwirkungen

Mit Hilfe des CFD-Modells Fire Dynamics Simulator (FDS) wurde die Wirkung eines Brandes auf die Gastemperaturen in einem Hörsaalgebäude untersucht. Für die Auslegung eines Stahlrahmentragwerks wurde als „ungünstigster Fall“ ein Brandszenario festgelegt, bei dem die gesamte Fläche der Stuhlreihen im Zuhörerbereich als Brandlast berücksichtigt wird.

Zusätzliche Annahmen zur Rauchabzugsanlage und Zuluft wurden nach Vorgabe der MVStättV [A2.2] getroffen, und es wurde ein brandbedingtes Versagen der Scheiben auf den

Längsseiten des Hörsaals bei 300 °C angenommen. Es wurden die notwendigen Schritte beschrieben, um mit FDS den Zeitverlauf der benötigten Temperaturen zu berechnen. Hierzu ist es erforderlich,

- das Modell auf eine Konvergenz der Lösung bei der gewählten Feinheit (Größe) der Zellen zu überprüfen und
- zur Festlegung des kritischsten Szenarios die Parameter zu variieren und die sich ergebenden Lösungen zu vergleichen.

Ein Gitter mit 25 cm Kantenlänge der Zellen hat sich bei der Simulation mit dem Feldmodell als ausreichend hinsichtlich der Konvergenz der Ergebnisse erwiesen. Es konnte gezeigt werden, dass Strömungen durch zusätzlich geöffnete Türen zu sehr unterschiedlichen Temperaturverteilungen im Raum führen und die höchsten Temperaturen nicht immer direkt über dem Brandherd erreicht werden müssen.

Eine Bemessung der Stahlbinder sollte daher für eine abdeckende gleiche Temperaturbeanspruchung erfolgen. Die maximale Temperatur am Riegel 3 wurde mit mehr als 800 °C berechnet. Die an diesem Binder und den zugehörigen Stützen berechnete Temperaturzeitkurve dient als Grundlage für die nachfolgenden Tragwerksnachweise.

A2.5 Brandschutzbemessung der Konstruktion

A2.5.1 Tragwerk und Einwirkungen

Bei der Tragkonstruktion des Auditoriums handelt es sich um 10 Stahlrahmen mit den Abmessungen $b = 29,10$ m und $h = 12$ m (Bild A2.15). Die Rahmen sollen als Zwei-Gelenk-Rahmen mit den Gelenken in den Fußpunkten vorgesehen werden. Der Achsabstand der Rahmen beträgt 3,75 m.

Die Stiele der Rahmen bestehen aus HEA 500-Profilen, die Riegel aus HEA 700-Profilen. Riegel und Stiel sind über geschraubte Stirnplattenstöße biegesteif miteinander verbunden (Bild A2.16). Die Kopfplatten haben eine Dicke von 25 mm. In der Rahmenecke befinden sich im Stiel zwei Steifen mit einer Dicke von ebenfalls 25 mm in Verlängerung der Riegelflansche. Die Fußplatte hat eine Dicke von 20 mm.

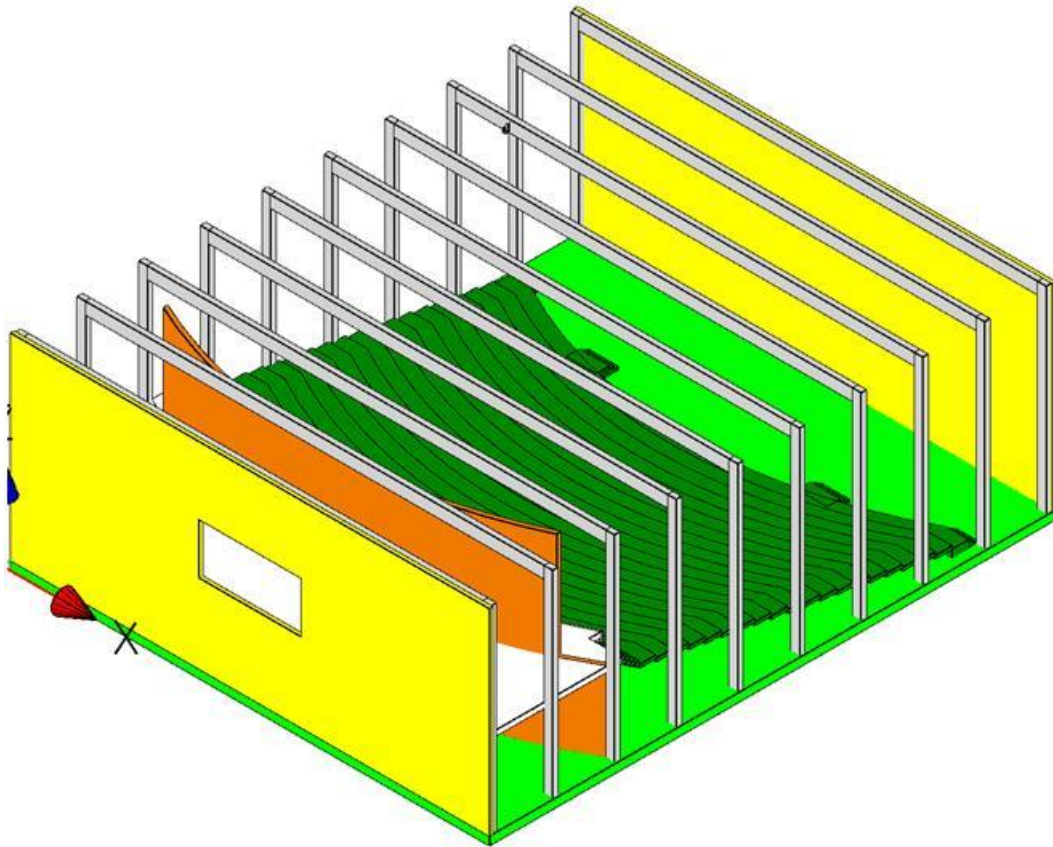


Bild A2.15 Tragkonstruktion des Auditoriums mit Stahlrahmen

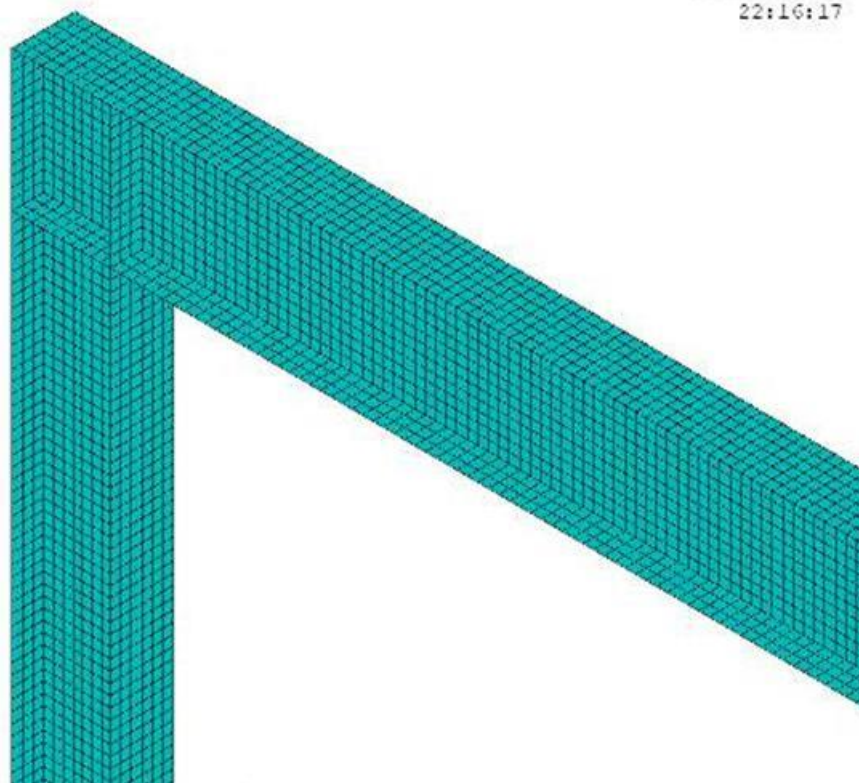


Bild A2.16 Eckausbildung der Stahlrahmens im Hörsaalgebäude

Zusammenstellung der Einwirkungen nach DIN EN 1991

Tabelle A2.5 Zusammenstellung des Eigengewicht des Daches

Sandwichelemente mit 100 mm Mineralwolle-Dämmung	0,20	kN/m ²
Akustikdecke aus A2-Baustoff	0,09	kN/m ²
Technische Ausbaulast	0,30	kN/m ²
Summe des Dacheigengewichts	0,59	kN/m ²

Linienlast infolge Eigengewicht Dach: $g_{k,1}$ 2,21 kN/m

Eigengewicht Stahl-Glas-Fassade: $g_{k,2}$ 1,88 kN/m

Schneelast:
 $s_k = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \cdot b = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,95 \text{ kN/m}^2 \cdot 3,75 \text{ m} =$ 2,85 kN/m

Wind zugewandte Seite:
 $w_{k,z} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \cdot b = 0,8 \cdot 0,72 \cdot 3,75 =$ 2,16 kN/m

Wind abgewandte Seite:
 $w_{k,a} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \cdot b = 0,8 \cdot (-0,35) \cdot 3,75 =$ -1,05 kN/m

Windbeanspruchung Flachdach
 $w_{k,F} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \cdot b = 0,8 \cdot (-1,8) \cdot 3,75 =$ -5,4 kN/m

$w_{k,H} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \cdot b = 0,8 \cdot (-0,7) \cdot 3,75 =$ -2,1 kN/m

$w_{k,l} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \cdot b = 0,8 \cdot 0,2 \cdot 3,75 =$ 0,6 kN/m

Lastfallkombination für die „kalte“ Bemessung: Grundkombination

$$E_d = E [\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}] \quad (\text{A2.31})$$

Lastfallkombination für die „heiße“ Bemessung: Außergewöhnliche Situation

$$E_d = E [\sum \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + A_d + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}] \quad (\text{A2.32})$$

(Anmerkung: In der Regel darf die quasi-ständige Größe $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ verwendet werden. Dies gilt nicht für Bauteile, deren Leiteinwirkung der Wind ist. In diesem Fall ist für die Einwirkung aus Wind die häufige Größe $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$ zu verwenden.)

Nach DIN EN 1991-1-1 [A2.15] sind folgende Teilsicherheitsbeiwerte sowie die Kombinationsbeiwerte nach Tabelle A2.6 für den Grenzzustand der Tragfähigkeit des Tragwerkes oder der tragenden Bauteile anzusetzen:

Ständige Einwirkungen (günstig): $\gamma_{G,sup} = 1,35$

Ständige Einwirkungen (ungünstig): $\gamma_{G,inf} = 1,00$

Veränderliche Einwirkungen (ungünstig): $\gamma_Q = 1,50$

Außergewöhnliche Einwirkungen (ungünstig): $\gamma_A = 1,00$

Tabelle A2.6 Kombinationsbeiwerte nach Tabelle A.1.1 aus DIN EN 1990 [A2.7]

	ψ	ψ	ψ
Nutzlasten in Versammlungsräumen	0,7	0,7	0,6
Schneelasten für Hochbauten < 1000 m ü. NN	0,5	0,2	0,0
Windlasten für Hochbauten	0,6	0,2	0,0

Daraus ergibt sich die Belastung in Bild A2.17. Dabei wird angenommen, dass die Lasten aus dem Riegel ohne planmäßige Ausmitte in die beiden Stiele eingeleitet werden.

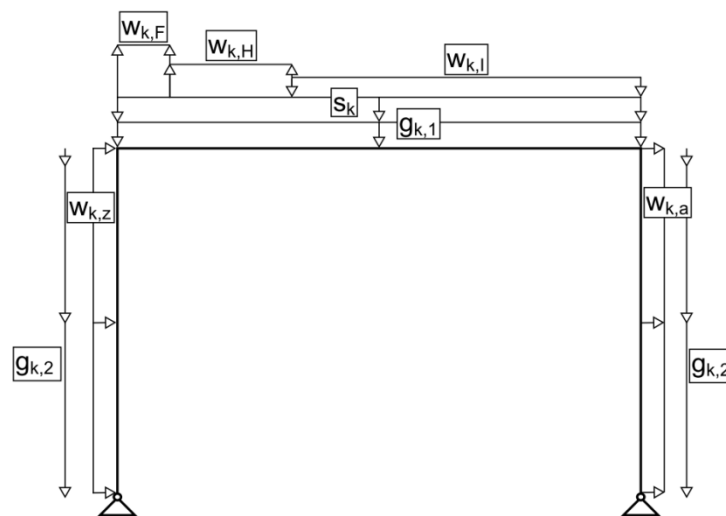


Bild A2.17 Charakteristische Belastung des Rahmens

In Anlehnung an [A2.15] wird bei den vertikalen Bauteilen eine sinusförmige Anfangsimperfektion in der Größe von $h/1000$ in Bauteilmitte angesetzt.

Für die Berechnung bei Normaltemperatur werden die Rahmenriegel durch die Dachpaneele quer zur Rahmenachse gehalten. Im Anwendungsfall ist dieser Nachweis speziell zu führen oder es müssen andere Maßnahmen zur Verhinderung des Biegedrillknickens ergriffen werden. Für die Berechnung im Brandfall wird die seitliche Halterung der Rahmenriegel durch die Dachpaneele weiter vorausgesetzt, da die Dachpaneele durch die wärmedämmende Isolierung der oberen Blechebene ihre Steifigkeit praktisch nicht verlieren. In der Modellierung, wird der Rahmenriegel in der Mitte des Obergurtes an der gesamten Flanschaußenseite gegen Verschiebung quer zur Rahmenachse gehalten. Bei den Rahmenstielen fehlt eine seitliche Halterung, sodass hier der Nachweis Biegedrillknicken geführt werden muss.

Für die Bemessung der Stahlrahmen wird als maßgebende Temperaturbeanspruchung der Verlauf mit den höchsten Brandraumtemperaturen ausgewählt (siehe Bild A2.18 sowie Tabelle A2.7). Auf der sicheren Seite liegend werden diese Brandraumtemperaturen unverändert über die Höhe der Rahmenstielen und über die Länge des Rahmenriegels angesetzt. Dabei wird vernachlässigt, dass der untere Teil des Rahmenstielen teilweise durch die Tragkonstruktion für die Stuhlreihen vor dem direkten Brandangriff abgeschirmt wird.

Anhang 2 Anwendungsbeispiel

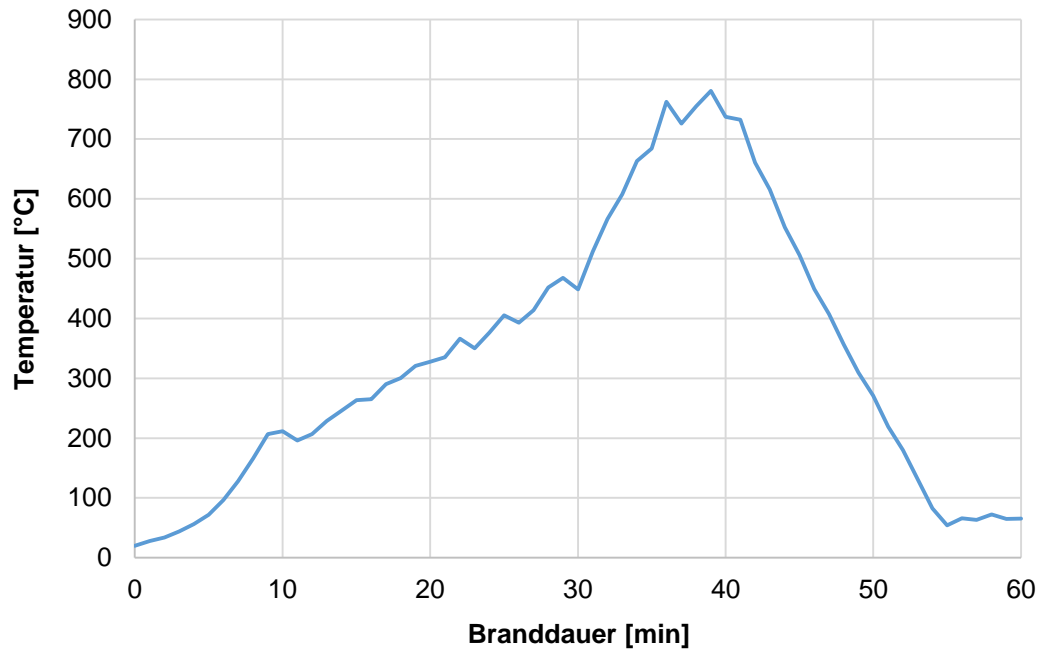


Bild A2.18 Zeitabhängige Temperatureinwirkung auf die Konstruktion im Riegel 3

Tab. A2.7 Zeitabhängige Temperatureinwirkung auf die Konstruktion im Riegel 3

Zeit [min]	Temperatur [°C]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Zeit [min]	Temperatur [°C]
0	20,2	20	327,6	40	737,1
1	28,2	21	335,2	41	732,6
2	34,1	22	366,1	42	660,4
3	44,3	23	350,1	43	615,7
4	56,4	24	376,4	44	552,5
5	71,7	25	405,2	45	505,7
6	96,5	26	392,9	46	449,0
7	128,3	27	413,9	47	407,2
8	166,3	28	451,8	48	356,6
9	206,8	29	467,7	49	309,4
10	211,1	30	448,8	50	271,2
11	196,2	31	511,9	51	219,0
12	206,6	32	566,5	52	179,8
13	228,8	33	607,8	53	131,2
14	245,7	34	663,2	54	82,7
15	263,5	35	684,1	55	54,1
16	265,3	36	762,1	56	66,0
17	290,3	37	725,9	57	63,5
18	300,4	38	755,0	58	72,2
19	320,6	39	780,5	59	65,1

A2.5.2 Materialgesetze

Die Erwärmung eines Bauteils ist abhängig vom Wärmeübergang am Bauteilrand und der Wärmeströmung im Bauteilinnern. Der durch ein Temperaturgefälle im Bauteil hervorgerufene Wärmestrom wird in seiner Geschwindigkeit von den temperatur- und werkstoffabhängigen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)], spezifische Wärme c_p [J/(k·K)] und Rohdichte ρ [kg/m³] beeinflusst. Als Wärmeübergangsbedingungen werden für die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der beflamten Oberfläche $\alpha_c = 35$ W/(m²K) und an der brandabgekehrten Oberfläche $\alpha_c = 9$ W/(m²K) sowie ein resultierender Emissionsgrad von $\varepsilon_{\text{res}} = 0,7$ angenommen [A2.16].

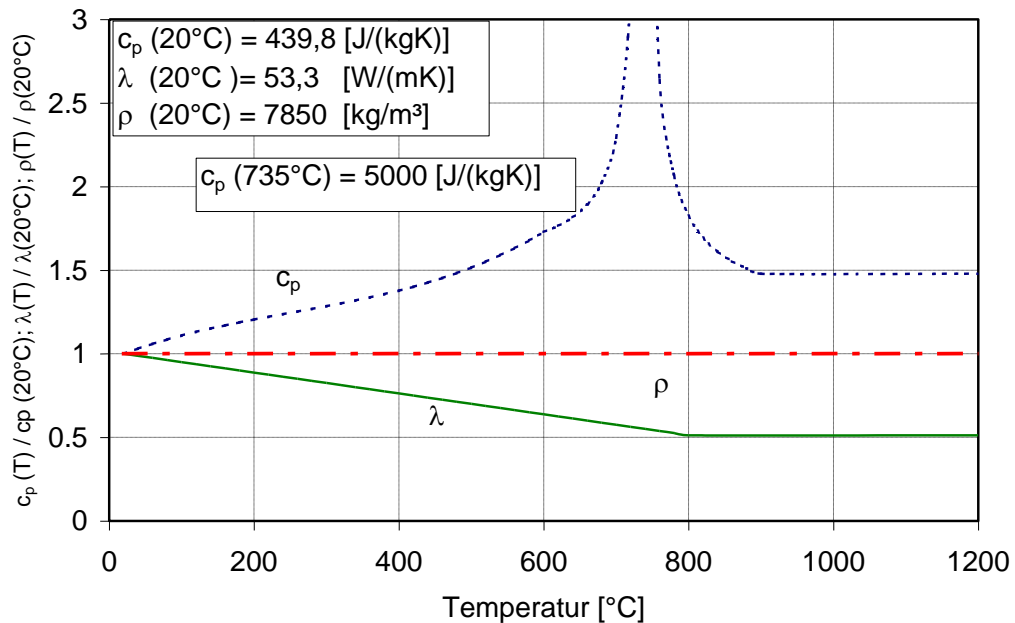


Bild A2.19 Temperaturabhängiger Verlauf thermischer Materialeigenschaften von Baustahl

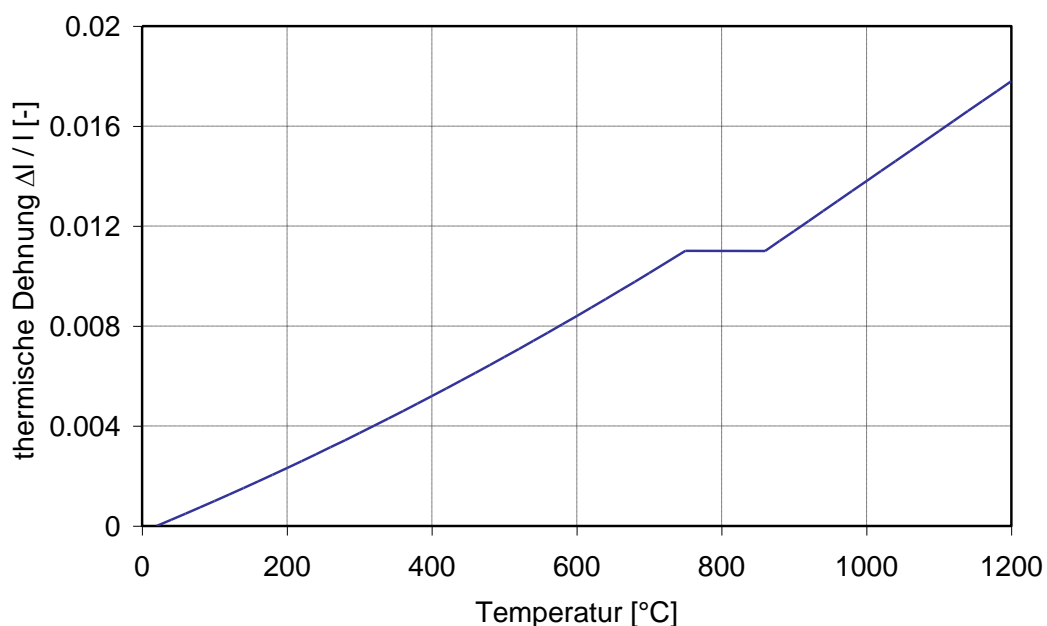


Bild A2.20 Thermische Dehnung von Baustahl

Die temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften für Baustahl sind in Eurocode 3 Teil 1-2 [A2.15] als temperaturabhängige Rechenfunktionen angegeben. Bild A2.19 zeigt den temperaturabhängige Verlauf von Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifischer Wärme (c_p) und Rohdichte von Baustahl und Bild A2.20 den Verlauf der thermischen Dehnung. In Bild A2.21 sind temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Baustahl S235 nach [A2.15] dargestellt. Bild A2.22 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf von Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifischer Wärme (c_p) und Rohdichte (ρ) von Mineralwolle.

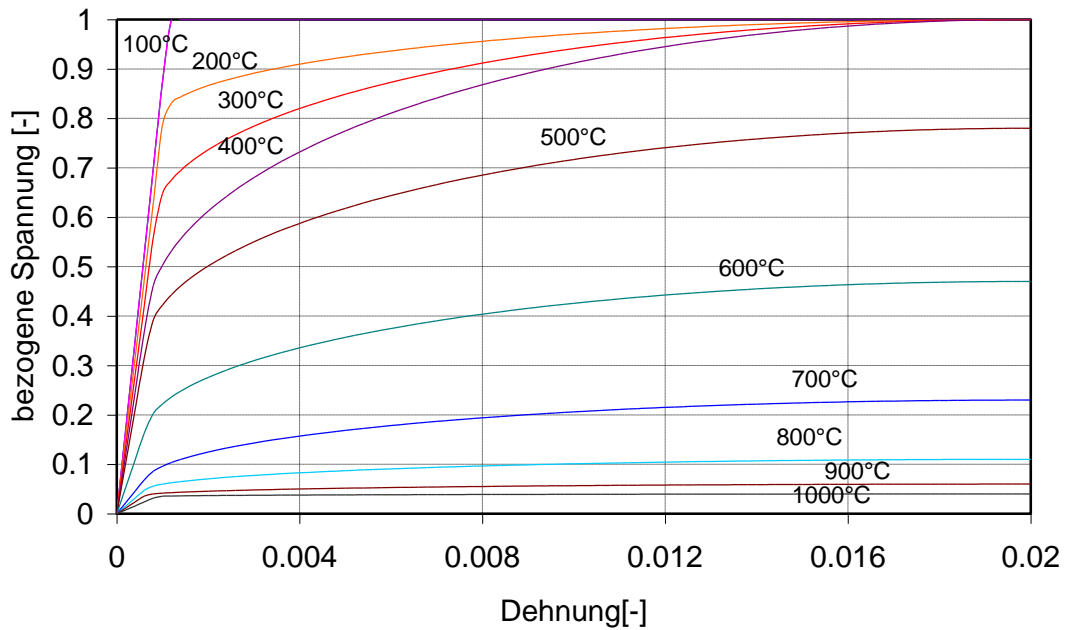


Bild A2.21 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Baustahl S235

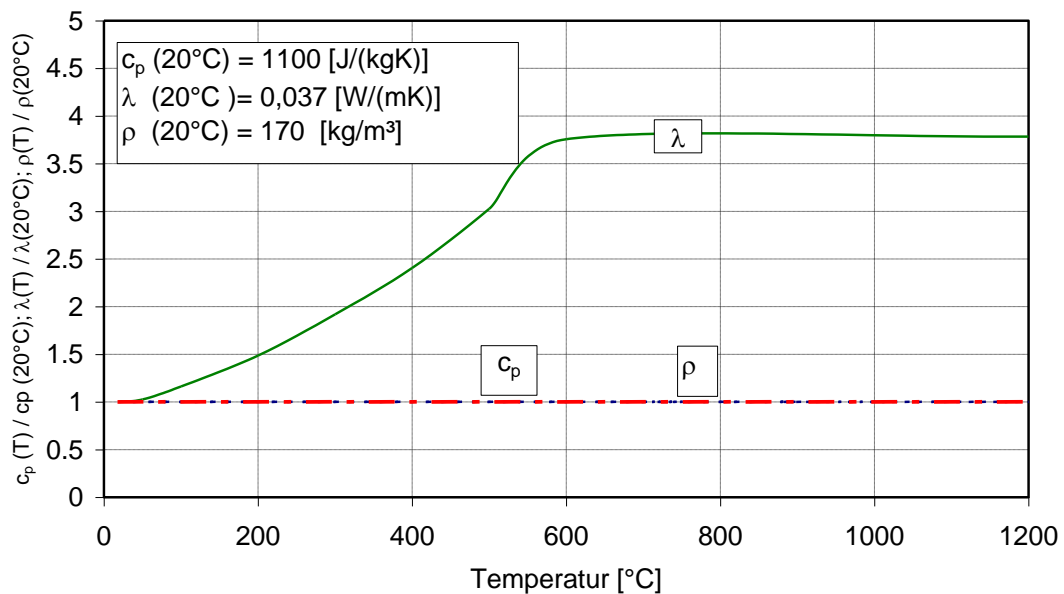


Bild A2.22 Temperaturabhängiger Verlauf thermischer Materialeigenschaften von Mineralwolle [A2.20]

A2.5.3 Bemessung der Konstruktion mit dem vereinfachten Bemessungsverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2

A2.5.3.1 Bemessung auf Temperaturebene

Das vereinfachte Bemessungsverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2 [A2.15], Abschnitt 4.2.4 erlaubt die Bestimmung der kritischen Temperatur in Abhängigkeit der Bauteilbelastung μ_0 , sofern nicht Verformungskriterien oder Einflüsse aus Stabilitätsproblemen zu beachten sind. Aus diesem Grund darf lediglich der Riegel auf Temperaturebene bemessen werden, da hier seitliche Halterungen vorhanden sind, die das Biegedrillknicken verhindern.

Die Ausnutzung der Rahmen $\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$ beträgt für den Riegel 0,59. Damit ergibt sich die kritische Stahltemperatur für die Riegel zu 557 °C.

Zur Ermittlung der Bauteiltemperatur bietet der Eurocode 3 Teil 1-2 [A2.15], Abschnitt 4.2.5.1 ein Verfahren an, mit dem der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ eines ungeschützten Stahlbauteils während eines Zeitintervalls Δt berechnet werden kann.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (A2.33)$$

Dabei ist:

- $\dot{h}_{net,d}$ der flächenbezogene Bemessungswert des Nettowärmestroms,
- k_{sh} Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt,
- A_m/V der Profilkoeffizient des ungeschützten Stahlbauteils,
- A die dem Brand ausgesetzte Oberfläche des Bauteils pro Längeneinheit,
- V das Bauteilvolumen pro Längeneinheit,
- c_a die spezifische Wärme von Stahl,
- Δt das Zeitintervall,
- ρ_a die Dichte von Stahl.

Bei I-Querschnitten unter anderer als der nominalen Brandeinwirkung sollte der Abschattungseffekt bestimmt werden mit:

$$k_{sh} = [A_m/V]_b / [A_m/V]$$

Dabei ist $[A_m/V]_b$ der Profilkoeffizient für den das Profil umschließenden Kasten. Konservative Ergebnisse werden erzielt, wenn der Abschattungseffekt nicht berücksichtigt wird (d. h. $k_{sh} = 1$).

Bei A_m und V handelt es sich um profilabhängige konstante Größen. ρ_a darf mit 7.850 kg/m³ ebenfalls als konstant angenommen werden. Die spezifische Wärme c_a ist eine temperaturabhängige Größe, die nach DIN EN 1993-1-2, Abschnitt 3.4.1.2 nach den Gleichungen (A2.37) bis (A2.40) berechnet wird. Die Stahltemperatur θ_a wird in °C angegeben:

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

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}] \quad (\text{A2.34})$$

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

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}] \quad (\text{A2.35})$$

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

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}] \quad (\text{A2.36})$$

für $900\text{ °C} \leq \theta_a < 1.200\text{ °C}$

$$c_a = 650 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}] \quad (\text{A2.37})$$

Der Netto-Wärmestrom $\dot{h}_{\text{net,d}}$ auf der brandbeanspruchten Oberfläche kann nach der DIN EN 1991-1-2 unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung nach Gleichung (3.1) berechnet werden. Der konvektive Anteil des Netto-Wärmestroms ergibt sich dabei aus Gleichung (3.2), der Netto-Wärmestrom durch Strahlung aus Gleichung (3.3), wobei $\varepsilon_m = 0,7$ und $\varepsilon_f = 1,0$ [A2.16], [A2.15] sowie $\phi = 1,0$ gewählt wurde.

Die Berechnung der Bauteiltemperatur nach Gleichung (A2.33) erfolgt zweckmäßig mit einem Tabellenkalkulations- oder Mathematikprogramm. Die Strahlungstemperatur des Brandes wird gleich der Gastemperatur angenommen, die aus der CFD-Berechnung stammt. Die Zeitschritte Δt dürfen nicht zu groß gewählt werden, in Eurocode 3 Teil 1-2 [A2.15] werden 5 s empfohlen. Hier wurden die Zeitschritte von 10 s aus der CFD-Berechnung für die Brandraumtemperatur eingesetzt. In einer Nebenrechnung wurde die Entwicklung der Bauteiltemperatur in 5 s-Schritten kontrolliert und nur eine sehr geringe Abweichung von weniger als 2 °C festgestellt. Für die zunächst unbekannte Bauteiltemperatur wird der Wert aus dem vorausgehenden Rechenschritt eingesetzt und dafür die Temperaturdifferenz $\Delta\theta_{a,t}$ nach Gleichung (A2.33) berechnet.

Das Ergebnis des vereinfachten Bemessungsverfahrens ist in Bild A2.23 dargestellt. Verglichen werden die Bauteiltemperaturen im Querschnitt des Rahmenriegels mit der nach Gleichung (6.1) ermittelten kritischen Temperatur. Es ist zu sehen, dass die Bauteiltemperatur im Riegel die kritische Stahltemperatur deutlich übersteigt. Somit kann der Rahmenriegel nach der Nachweismethode der kritischen Temperatur nicht ungeschützt ausgeführt werden.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei statisch unbestimmt gelagerten Bauteilen der Nachweis mit Hilfe der kritischen Temperatur unter Umständen stark auf der sicheren Seite liegt. Im Brandfall steigen im Rahmen die Eckmomente bis zum Erreichen des plastischen Moments an. Dadurch wird das Feldmoment verringert, wodurch die kritische Temperatur sich tatsächlich erhöht. Dieser Effekt wird bei dem Nachweis entsprechend [A2.15] nicht berücksichtigt, da die Einwirkung und der Widerstand zur 0. Minute ermittelt werden.

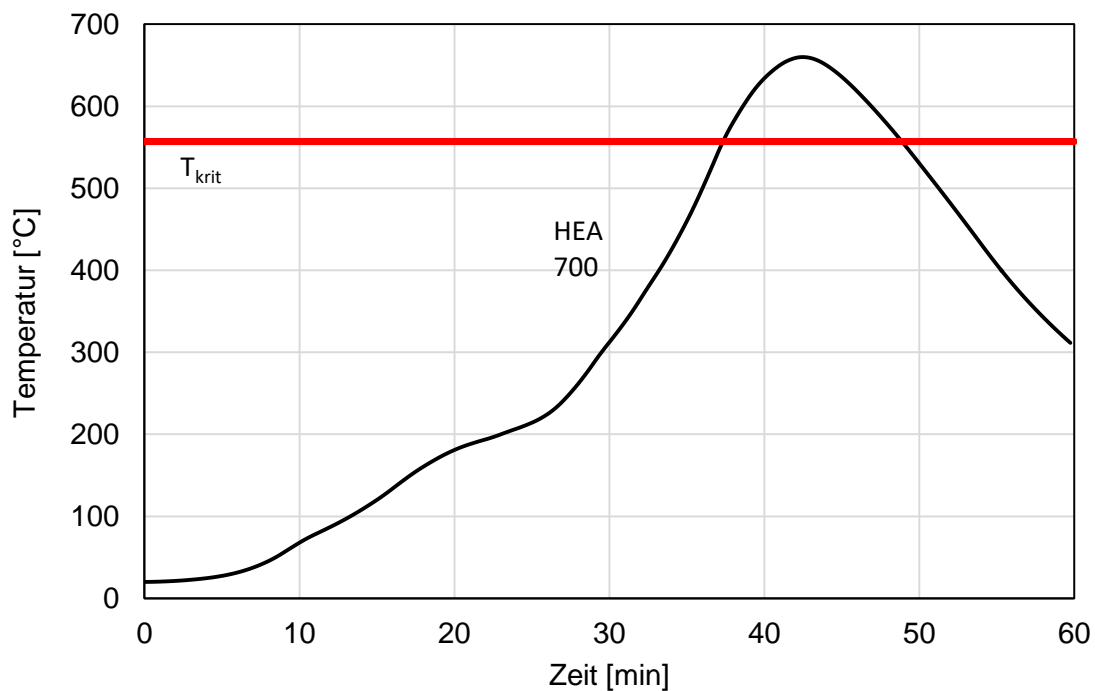


Bild A2.23 Temperaturzeitverlauf im Rahmenriegel (HEA 700) nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren nach DIN EN 1993-1-2[A2.15]

A2.5.3.2 Bemessung der stabilitätsgefährdeten Bauteile (hier Stiele)

Der Nachweis der Standsicherheit im Brandfall wird nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren auf Tragfähigkeitsebene gemäß Abs. 4.2 [A2.15] geführt. Der Nachweis erfolgt unter Ansatz der maßgebenden Lastfallkombination.

Die Knickstabilität für das vorliegende Beispiel wird mittels des Ersatzstabverfahrens nachgewiesen. Gemäß Abs. 5.2.2 (8) [A2.17] müssen bei der Verwendung des Ersatzstabverfahrens weder Imperfektionen des Stiels, noch Schnittgrößen infolge Theorie II. Ordnung berücksichtigt werden.

Als Werkstoff kommt die Stahlsorte S235 mit einer Streckgrenze von $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ zum Einsatz. Der E-Modul liegt bei 210.000 N/mm^2 . Gemäß der [A2.17] wird das HEA 500-Profil in die Querschnittsklasse 1 eingeordnet.

Die Querschnittswerte, Stahlgüte und Profilkennwerte für das verwendete Profil sind in Tabelle A2.8 dargestellt. Aus der thermischen Analyse nach Gleichung A2.36 ergibt sich eine Maximaltemperatur von ca. 672°C im Stiel.

Tabelle A2.8 Profilkennwerte des Stiels

Stütze / Querschnittswert	Rahmenstiel
Profil	HEA 500
Stahlgüte	S235
Profilfläche A [cm ²]	198
I _y / I _z [cm ⁴]	86970/10370
W _{el,y} / W _{el,z} [cm ³]	3550/691
W _{pl,y} / W _{pl,z} [cm ³]	3949/1059
I _T [cm ⁴]	309
I _w [cm ⁶]	5643000

Bei der Ermittlung der abgeminderten mechanischen Kennwerte in Abhängigkeit der unregelmäßigen Querschnittstemperatur wird, auf der sicheren Seite liegend, die maximale Temperatur im Querschnitt als maßgebende Temperatur angesetzt.

Tabelle A2.9 zeigt die abgeminderten mechanischen Kennwerte (gemäß Tab.3.1 [A2.15]) für die verschiedenen maßgebenden Stützen bei der Bemessungstemperatur.

Tabelle A2.9 Abgeminderte mechanische Kennwerte bei Bemessungstemperatur für die Stützen

Stütze/Querschnittswert	Rahmenstiel
Bemessungstemperatur	672°C
k _{y,e} [-]	0,297
k _{E,e} [-]	0,18

Im Folgenden soll nachgewiesen werden, dass die Tragfähigkeit im Brandfall sichergestellt wird. Zu diesem Zweck werden die Nachweise für die durch Biegung und axialen Druck beanspruchte Bauteile gemäß Abs. 4.2.3.5 [A2.15] geführt (Knicksicherheitsnachweis, Biegedrillknicknachweis). Die maßgebende Lastfallkombination setzt sich aus den Belastungen durch Eigengewicht und Wind zusammen:

$$E_d = E [\sum 1,0 \cdot G_{ki} + 0,2 \cdot w_k]$$

Daraus ergeben sich für die Stiele folgende Belastungen entsprechend den Einwirkungen nach Tabelle A2.5:

Aus Eigengewicht des Daches, der Fassade sowie der Stahlträger:

$$\begin{aligned} N_{Ed,fi} &= 1,0 \cdot (G_{k,1} + G_{k,2}) = 1,0 \cdot ((-2,21 \text{ kN/m}) \cdot 29,1 \text{ m} \cdot 0,5 + (-1,88 \text{ kN/m}) \cdot 12 \text{ m} \\ &\quad + (-1,55 \text{ kN/m}) \cdot 12 \text{ m} + (-2,04 \text{ kN/m}) \cdot 29,1 \text{ m} \cdot 0,5) \\ &= -102,9 \text{ kN} \end{aligned}$$

Aus Wind:

$$E_d = 0,2 \cdot (w_{k,z} + w_{k,a} + w_{k,F} + w_{k,H} + w_{k,l})$$

Daraus ergibt sich folgende maximale Druckkraft im Stiel:

$$N_{Ed,fi} = -1,91 \text{ kN}$$

Der Wind ist die einzige Beanspruchung, die planmäßig ein Moment im Stiel hervorruft. Für die Bemessung maßgebend ist das Einspannmoment an der Verbindung zwischen Rahmen und Stiel. Bei der Berechnung der Momentenbeanspruchung muss die Tragwirkung des gesamten Rahmens berücksichtigt werden, da an dem einen Stiel eine Windsog- und an dem anderen Stiel eine Winddruckbeanspruchung auftritt (vgl. Bild A2.23 charakteristische Belastung des Rahmens).

Aus dieser Beanspruchung ergeben sich die bemessungstechnisch maßgebenden Momente an der Verbindung zwischen Rahmen und Stiel zu:

$$M_{wk} = -49,28 \text{ kNm}$$

$$M_{wd} = 0,2 \cdot (-49,28) \text{ kNm} = -9,86 \text{ kNm}$$

Zusätzlich entsteht infolge der horizontalen Windbelastung eine vertikale Auflagerkraft, die aber aufgrund ihrer geringen Größe hier vernachlässigt wird.

Das Moment infolge der Windbeanspruchung wirkt in Richtung der starken Achse des HEA 500 Profils, sodass der Stabilitätsnachweis für die starke Achse geführt wird. Zusätzlich wird der Stabilitätsnachweis für die schwache Achse geführt. Da die Momentenbeanspruchung durch den Wind nur in Richtung der starken Achse wirkt, wird der Nachweis für die schwache Achse ohne Beanspruchung durch den Wind geführt.

Im Folgenden werden der Biegeknicknachweis entsprechend Abschnitt 4.2.3.5, Gleichung 4.21a [A2.15] sowohl für die schwache als auch die starke Achse und der Biegedrillknicknachweis entsprechend Abschnitt 4.2.3.5, Gleichung 4.21b [A2.15] nur für die starke Achse geführt.

Biegeknicknachweis:

Die Knicklänge wird entsprechend [A2.17] für einen Rahmen mit gelenkig gelagerten Fußpunkten bestimmt. Dabei wird in Abhängigkeit der Steifigkeiten von Stiel und Riegel der Verzweigungslastfaktor und daraus die Knicklängen der Rahmenstiele ermittelt. Damit ergibt sich die Knicklänge zu:

$$s_{k,z} = 27,82 \text{ m}$$

Für den Biegeknicknachweis werden folgende Formeln und Kennwerte entsprechend [A2.15] verwendet:

- Teilsicherheitsbeiwert im Brandfall: $\gamma_{M,fi} = 1,0$
- Trägheitsradius: $i_z = \sqrt{(I_z / A)}$
- Schlankheitsgrad: $\lambda_{k,z} = s_{ki,z} / i_z$

$$\lambda_1 = 93,6 \cdot \sqrt{(235 / f_y)}$$

– bezogene Schlankheit: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{k,z}}{\lambda_1}$

– bezogene Schlankheit im Brandfall : $\bar{\lambda}_{k,z} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}}$

– Abminderungsfaktor $\chi_{fi,z}$ für das Biegeknicken:
$$\chi_{fi,z} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_{\theta,z}^2}}$$

mit: $\alpha = 0,65 \cdot \sqrt{235 / 235} = 0,65$

$$\phi_\theta = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right)$$

- Beiwert zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs im Brandfall k_y bzw. k_z

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{m,fi}} \leq 3,0$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{m,fi}} \leq 3,0$$

mit: Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs $\beta_m=1,1$
(Bild 4.2, [A2.35] ungünstigster Wert)

$$\mu_y = (2 \cdot \beta_{M,y} - 5) \cdot \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \cdot \beta_{M,y} - 0,29 < 0,8$$

$$\mu_z = (1,2 \cdot \beta_{M,z} - 3) \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44 \cdot \beta_{M,z} - 0,29 < 0,8$$

Die Ermittlung der Kennwerte und Abminderungsfaktoren erfolgt in Tabellenform in Tabelle A2.10.

Nachweis Biegeknicken nach Abschnitt 4.2.3.5, Gleichungen 4.21a [A2.15]:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_{y,k} / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_{y,k} / \gamma_{M,fi}} \leq 1,0$$

Biegeknicknachweis (starke Achse):

$$\frac{104,8}{0,032 \cdot 198 \cdot 0,297 \cdot 235 / 10} + \frac{1,93 \cdot 9,86 \cdot 100}{3949 \cdot 0,297 \cdot 235 / 10} = 2,37 + 0,1 = 2,47 > 1,0$$

Tabelle A2.10 Kennwerte für den Knicksicherheitsnachweis

Stütze / Berechneter Wert	Rahmenstiel
i_y / i_z [cm]	20,96 / 7,24
$\bar{\lambda}_y / \bar{\lambda}_z$	1,4 / 4,1
$\bar{\lambda}_{\Theta,y} / \bar{\lambda}_{\Theta,z}$	1,82 / 5,26
φ_{Θ}	2,74/ 16,0
μ_y / μ_z	-4,89/ -8,34
k_y / k_z	2,74 / 3
$\chi_{fi,y} / \chi_{fi,z}$	0,21 / 0,032

Biegeknicknachweis (schwache Achse):

$$\frac{104,8}{0,032 \cdot 198 \cdot 0,297 \cdot 235 / 10} = 2,37 > 1,0$$

Der Nachweis im Brandfall konnte nicht erbracht werden.

Als nächstes wird aus Gründen der Vollständigkeit für den Stiel der Biegedrillknicknachweis geführt. Dieser ist nur für die starke Achse zu führen, da nur hier zusätzlich zur Normalkraft eine Momentenbeanspruchung vorliegt. Im Brandfall erfolgt der Nachweis nach Abs. 4.2.3.5, Gleichungen 4.21b [A2.15].

Die Beanspruchungen sind identisch mit denen, die für den Biegeknicknachweis ermittelt wurden.

Die Ermittlung der Kennwerte und Abminderungsfaktoren berechnet sich aus folgenden Formeln:

– Ideales Biegedrillknickmoment: $M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[\sqrt{(c^2 + 0,25 \cdot z_p^2)} + 0,5 \cdot z_p \right]$

mit: $c^2 = (I_w + 0,039 \cdot I^2 \cdot I_T) / I_z$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l^2}$$

– Bezogene Schlankheit für das Biegedrillknicken: $\bar{\lambda}_{lt} = \sqrt{W_{pl,y} \cdot f_y / M_{cr}}$

– Allgemeiner Abminderungsfaktor für das Biegedrillknicken im Brandfall:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\Phi_{LT,\Theta,com} + \sqrt{[\Phi_{LT,\Theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\Theta,com}]^2}}$$

Anhang 2 Anwendungsbeispiel

$$\text{mit: } \Phi_{LT,\theta,com} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + \left(\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} \right)^2 \right]$$

$$\lambda_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{lt} \cdot \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}}$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235 / f_y}$$

Der Biegedrillknicknachweis im Brandfall unter zusätzlicher Druckbeanspruchung wird für einen Querschnitt der Querschnittsklasse 1 gemäß Gl. 4.21b [A2.15] in Tabelle A2.11 nachgewiesen.

Tabelle A2.11 Kennwerte für den Knicksicherheitsnachweis

Berechneter Wert	Rahmenstiel
ζ	2,25
c^2 [cm ²]	2217,59
z_p [cm]	24,5
M_{cr} [kNm]	1993
$\bar{\lambda}_{LT}$	0,647
$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	0,83
α	0,65
$\Phi_{LT,\theta,com}$	1,12
$\chi_{LT,fi}$	0,54

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1,0$$

$$\text{mit } \gamma_{M,fi} = 1,00$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

Auf der sicheren Seite liegend wird $k_{LT} = 1$ gesetzt. Der Biegedrillknicknachweis lautet wie folgt:

$$\frac{104,8}{0,032 \cdot 198 \cdot 0,297 \cdot 235 / 10} + \frac{1,0 \cdot 986}{0,54 \cdot 3949 \cdot 0,297 \cdot 235 / 10} = 2,37 + 0,066 = 2,4 > 1,0$$

Der Nachweis gegen Biegedrillknicken im Brandfall wird ebenfalls nicht erfüllt.

Die Lösungsmöglichkeit des Problems könnte in einem brandschutztechnischen Schutz (Bekleidung, Anstrich) der Bauteile bestehen.

Im folgenden Abschnitt wird der Nachweis mit Hilfe des erweiterten Bemessungsverfahrens geführt. Dazu wird zunächst die Temperaturverteilung innerhalb des Querschnitts ermittelt (thermische Analyse) und danach die Tragfähigkeit des gesamten Rahmens in einer mechanischen Analyse berechnet.

A2.5.4 Bemessung der Konstruktion mit dem allgemeinen Bemessungsverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2

A2.5.4.1 Ermittlung der Bauteiltemperaturen

Für die Berechnung der Bauteiltemperaturen wird ein 2-D Finite-Element-Modell erzeugt. Verwendet wird das FE-Programm ANSYS [A2.21]. Dabei werden die Temperaturverteilungen getrennt für die Stiele und den Riegel des Rahmens ermittelt. Um die Anwendung des Leitfadens zu verdeutlichen, werden die Ermittlung der Bauteiltemperaturen und die Berechnung der Tragfähigkeit des erwärmten Stahlrahmens getrennt betrachtet.

Der Aufbau des 2-D-Temperaturmodells wird exemplarisch für den Querschnitt des Rahmenriegels gezeigt (Bild A2.24). Für das FE-Modell wurde ein Ausschnitt aus dem Rahmenriegel mit dem darauf liegenden Dachpaneel gewählt. Die Berücksichtigung des Dachpaneels ist wichtig, um das verzögerte Abfließen der Wärme nach oben bzw. nach außen in der thermischen Analyse zu erfassen. Es wurde ein Überstand der Dachpaneele auf beiden Seiten von 50 cm berücksichtigt. Das Riegelprofil wird von drei Seiten mit Temperatur beaufschlagt. Da eine 2-D-Temperaturberechnung auch auf einem durchschnittlichen PC nur wenig Zeit in Anspruch nimmt, kann die Elementierung fast beliebig fein gewählt werden.

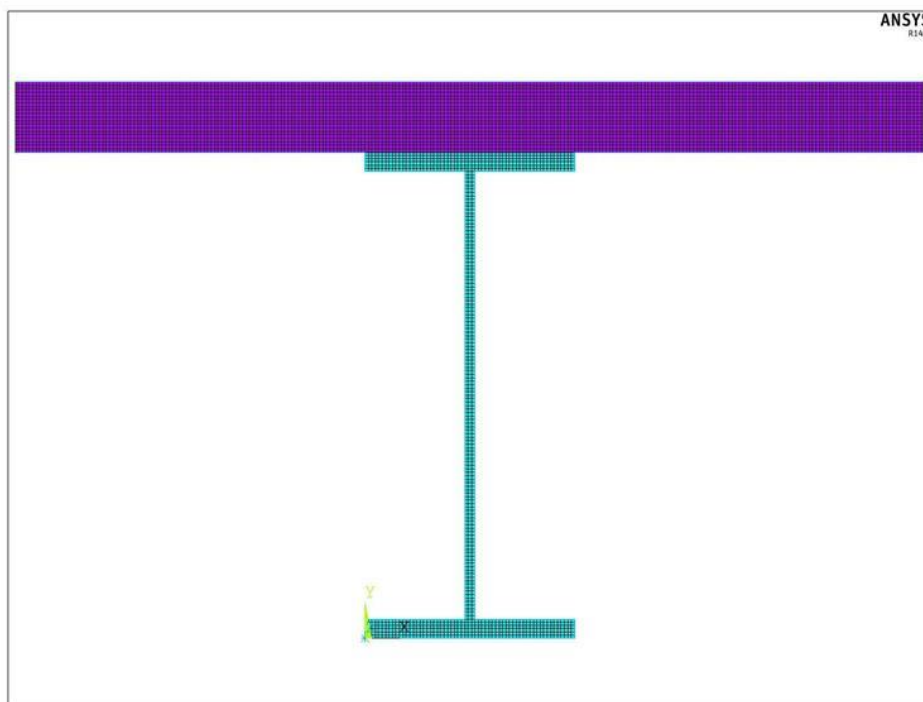


Bild A2.24 FE-Modell für die Temperaturberechnung des Rahmenriegels

Anhang 2 Anwendungsbeispiel

Den Elementen werden die thermischen Materialeigenschaften von Stahl und Dämmmaterial zugewiesen. Als Strahlungsquelle wird ein Punkt außerhalb des Querschnitts gewählt. Zudem muss die Wärmestrahlung aufnehmende Oberfläche des Querschnitts definiert werden. Dabei handelt es sich um die Oberfläche des Stahlprofils (mit Ausnahme der brandabgekehrten Seite des oberen Flansches) sowie die Unterseite der Dachkonstruktion. Für diese Oberflächen werden die Wärmeübergangsbedingungen definiert, welche durch die Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ dargestellt werden.

Die Ergebnisse der Erwärmungsberechnung in Bild A2.25 zeigen, dass eine Maximaltemperatur von 703°C im Steg und 664°C im Flansch erreicht wird.

Die Erwärmung der Profile im Steg wird in Bild A2.26 dargestellt. Das Temperaturmaximum im Steg wird ca. 200 s nachdem die Brandraumtemperatur ihr Maximum überschritten hat, erreicht.

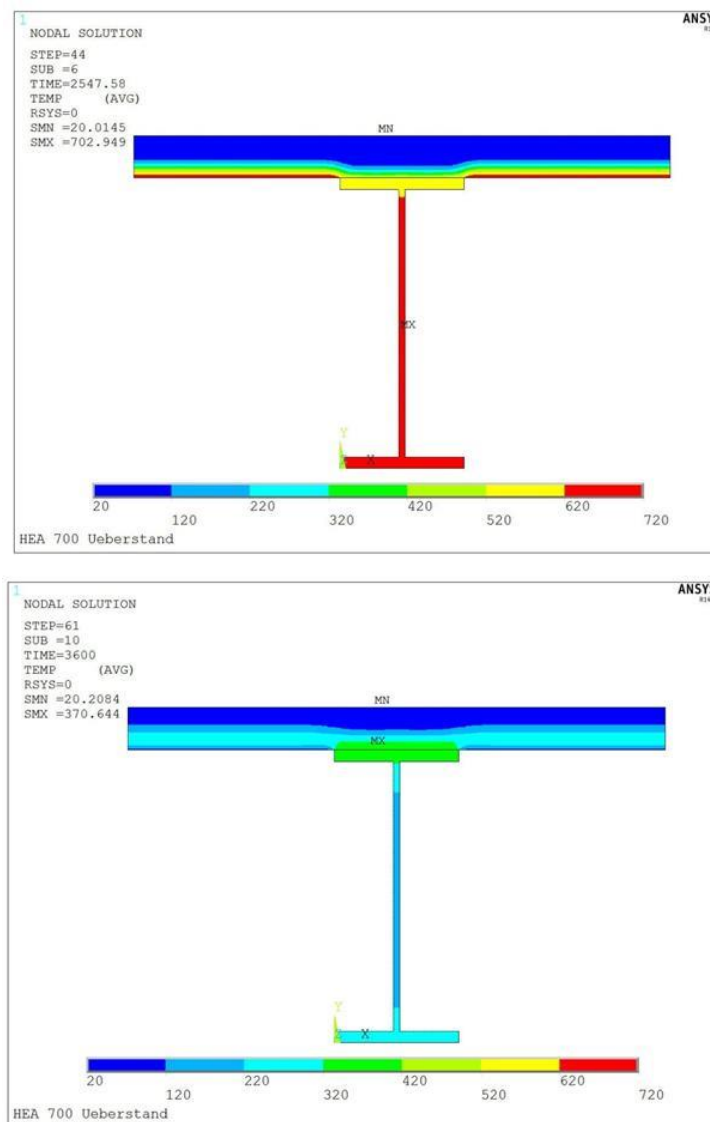


Bild A2.25 Durchwärmung des Rahmenriegels HEA 700, oben: beim Temperaturmaximum im Steg nach 2.540 s, unten: am Ende der Wärmefreisetzung nach 3600 s

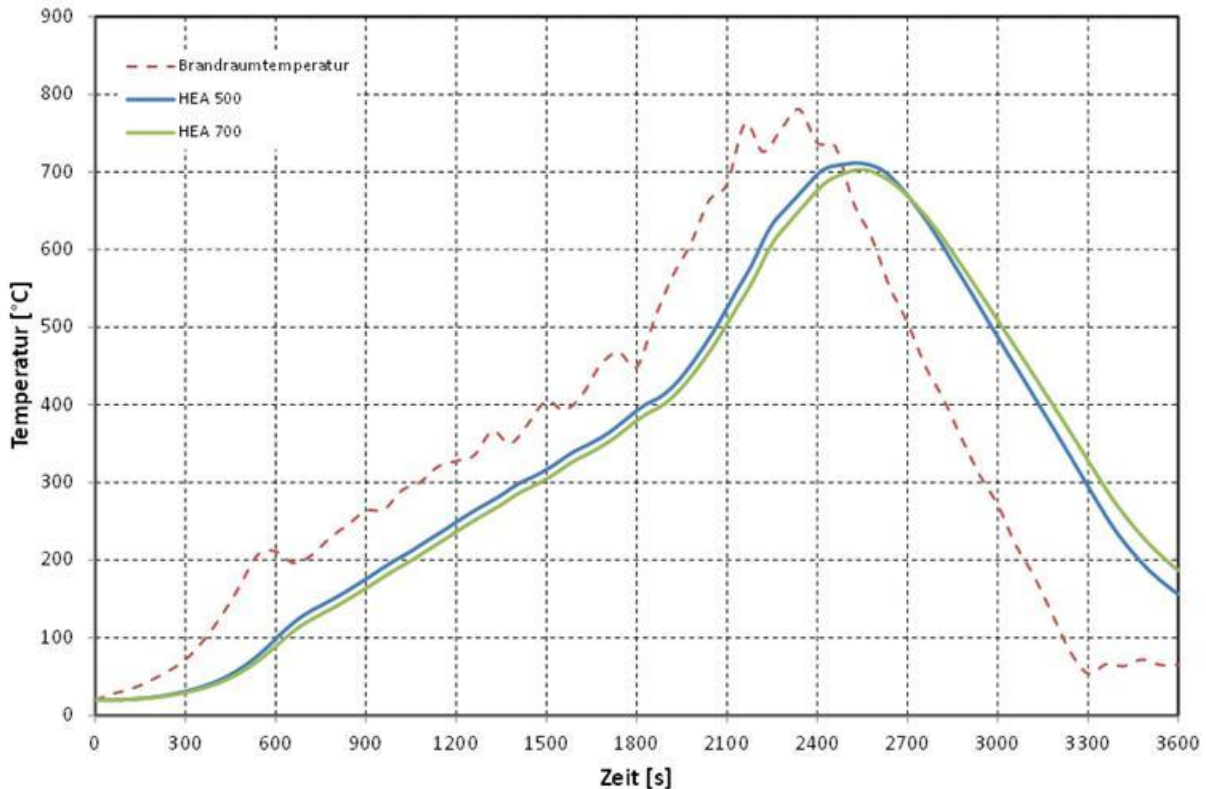


Bild A2.26 Temperaturverlauf im Steg der Profile HEA 500 und HEA 700

A2.5.4.2 Tragwerksanalyse

Die Temperaturen für die Profile HEA 500 und HEA 700 differieren nur unwesentlich, sodass als Einwirkung für die Tragwerksanalyse der Temperaturverlauf im Steg des Stützenprofils HEA 500 mit einer maximalen Temperatur von 711 °C für alle Stege im Rahmen angenommen wird. Der Temperaturverlauf im unteren Flansch des HEA 500 ist mit einer maximalen Temperatur von 679 °C der maßgebende Verlauf für alle anderen Bauteile (Flansche, Steifen, Kopf- und Fußplatte).

Die Auflagerung der Rahmenstiele erfolgt über eine Fußplatte. Der Mittelknoten der Fußplatte wird in Richtung des Rahmenstiels (y -Achse) gehalten. Die Fußplatte wird an den Knoten der Flansche, d. h. quer zur Rahmenachse (z -Achse) und der Steg in Richtung der Rahmenachse (x -Achse) gehalten. Dadurch wird eine minimale Einspannung simuliert, wie sie bei realen Rahmen infolge der Fixierung der Fußplatte durch Dübel oder Anker auftritt.

Die Rahmenecken werden außen zwischen Stütze und Riegel senkrecht zur Rahmenachse aufgelagert. Der Obergurt des Riegels in Rahmenmitte wird ebenfalls quer zur Rahmenachse (in z -Richtung) über die komplette Profilbreite gehalten.

Die Elementgröße beträgt ca. 5 cm.

Die Ergebnisse der Tragwerksanalyse zeigen, dass es auf Grund der hohen Temperaturen und den Abmessungen der Bauteile – insbesondere der Länge des Rahmenriegels – zu großen thermisch bedingten Verformungen kommt (Bild A2.27).

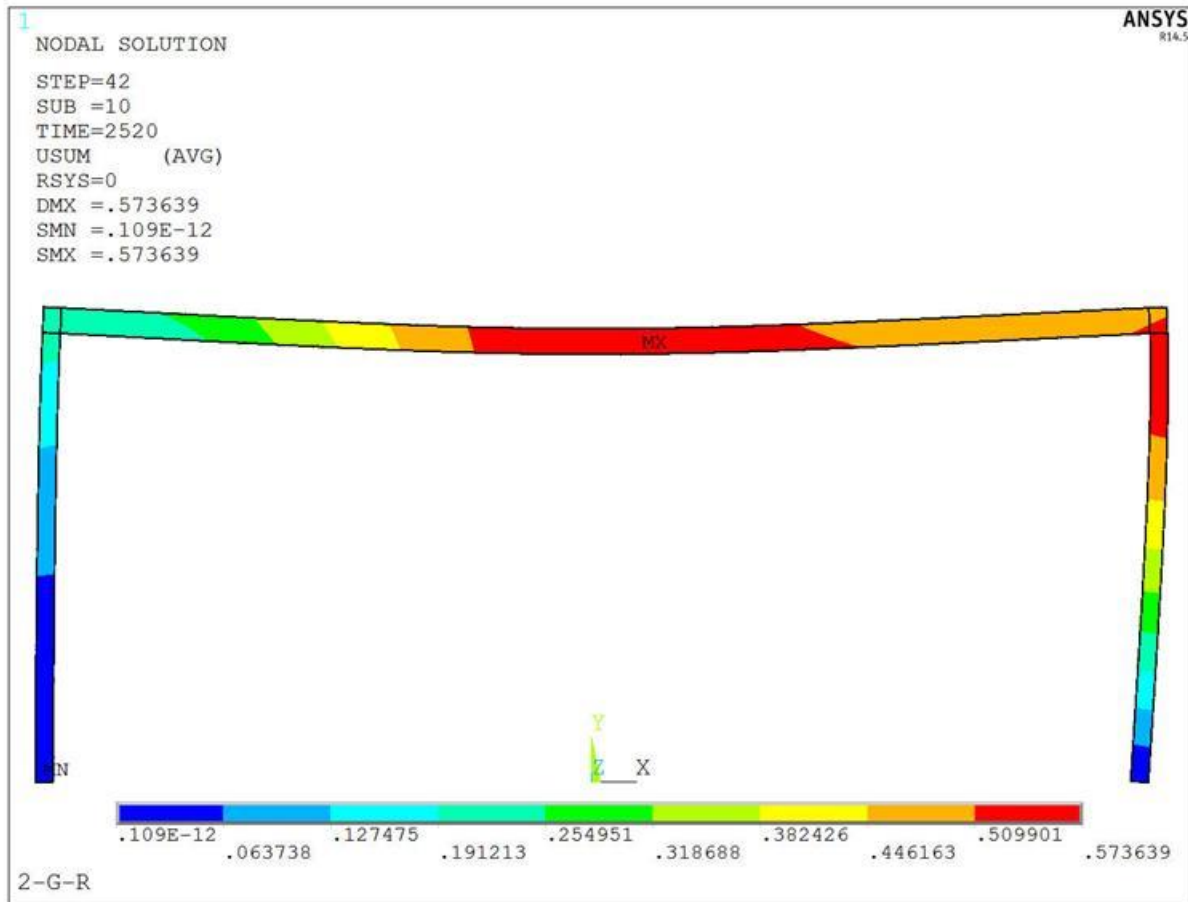


Bild A2.27 Gesamtverformung des Rahmens (True Scale) beim Verformungsmaximum. Die Skala zeigt die summierten Verformungen der Knoten in alle Richtungen in [m]

Im Bereich der Rahmenecke treten plastische Dehnungen auf (Bild A2.28). Dies macht deutlich, dass mit Hilfe der genauen rechnerischen Analyse die Tragfähigkeit bis in den Bereich großer Verformungen erfasst wird. Bei Anwendung des erweiterten Bemessungsverfahrens mit der FE-Methode können Tragwerksreserven mobilisiert werden, die weder beim tabellarischen Nachweis noch beim vereinfachten Bemessungsverfahren berücksichtigt werden können.

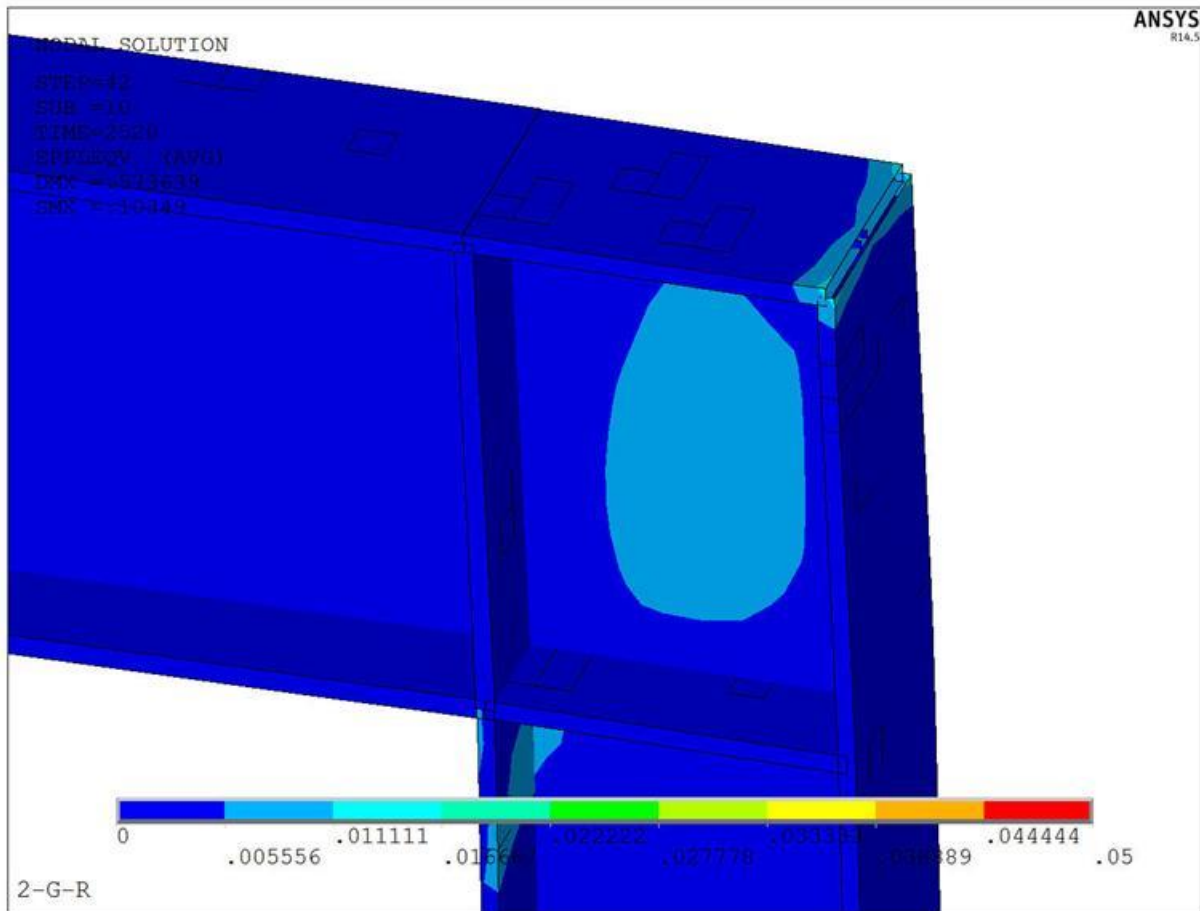


Bild A2.28 Plastische Dehnungen

In Bild A2.29 und Bild A2.30 werden die horizontale und vertikale Verschiebung der linken Rahmenecke gezeigt. Aufgrund der Erwärmung des Rahmens kommt es zu einer starken Verlängerung des Rahmenriegels. Dadurch bewegen sich die Rahmenecken auseinander. Diese Verschiebung ist auf der windzugewandten Seite des Rahmens so groß, dass die Verschiebung infolge Windeinwirkung aufgehoben und die Verschiebung des Rahmenknotens nach ca. 700 s in entgegengesetzter Richtung erfolgt. Nach ca. 2100 s steigt die Durchbiegung des Rahmenriegels stark an, sodass die Rahmenecke zu diesem Zeitpunkt ebenfalls einen starken Verformungsanstieg aufweist.

Betrachtet man die vertikale Verschiebung des Untergurtes des Rahmenriegels in Feldmitte in Bild A2.31, so ist zunächst die Durchbiegung aus der Lasteinwirkung zu erkennen. Mit zunehmender Temperatureinwirkung scheint sich der Riegel nach oben durchzubiegen. In Wirklichkeit überlagern sich hier jedoch zwei Effekte, wie durch den Vergleich von Bild A2.31 und Bild A2.30 deutlich wird. Zum einen vergrößert sich die Durchbiegung des Riegels infolge der Lasteinwirkungen, da durch die Temperatureinwirkung die Steifigkeit sinkt. Zum anderen wird durch die thermische Ausdehnung der Stützen der gesamte Riegel angehoben. Die Differenz aus der Verformung von Bild A2.31 und Bild A2.30 entspricht der tatsächlichen Durchbiegung des Rahmenriegels (Bild A2.32). Im Bild A2.32 ist zu erkennen, dass keine Durchbiegung nach oben erfolgt.

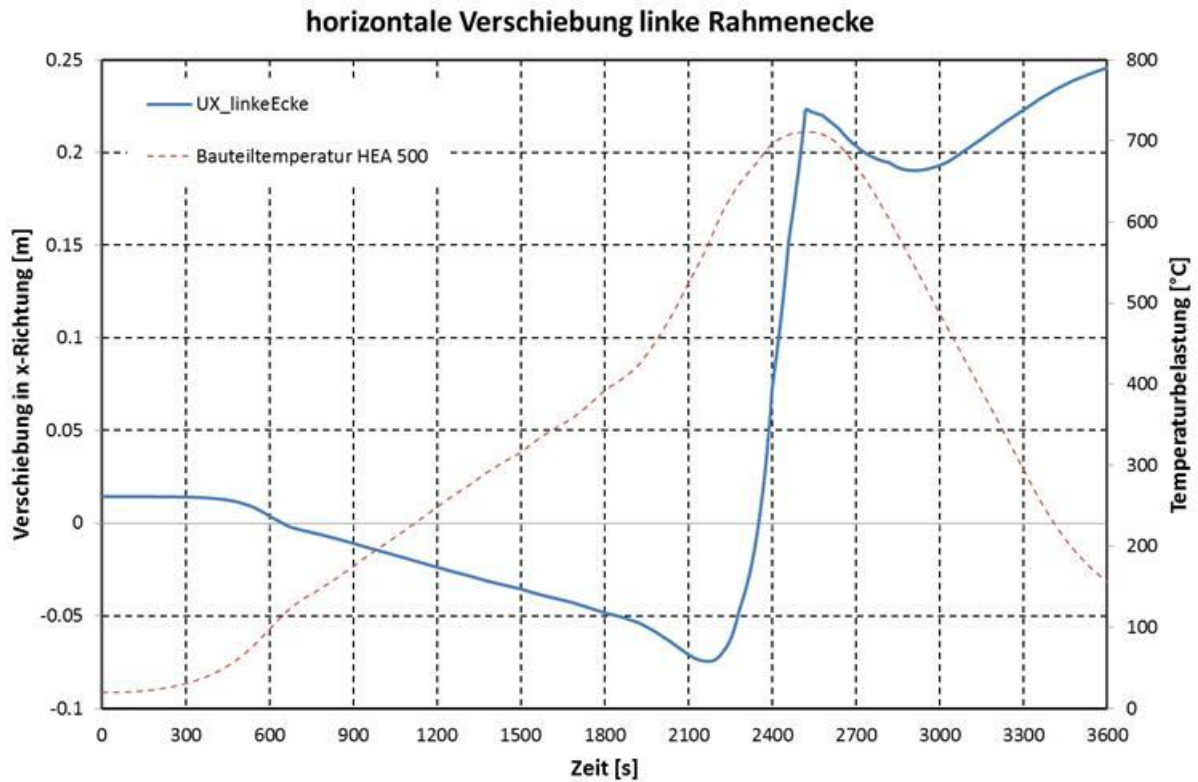


Bild A2.29 Horizontale Verschiebung der linken (windzugewandten) Rahmenecke

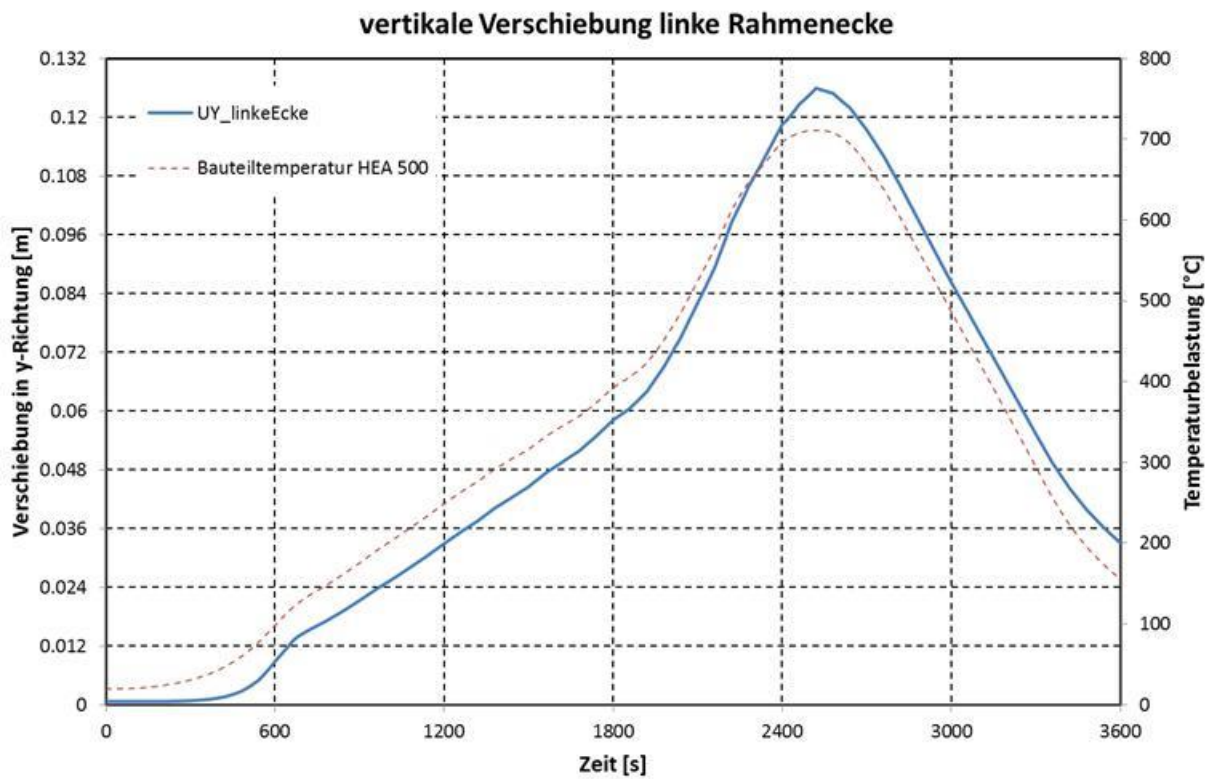


Bild A2.30 Vertikale Verschiebung der linken Rahmenecke

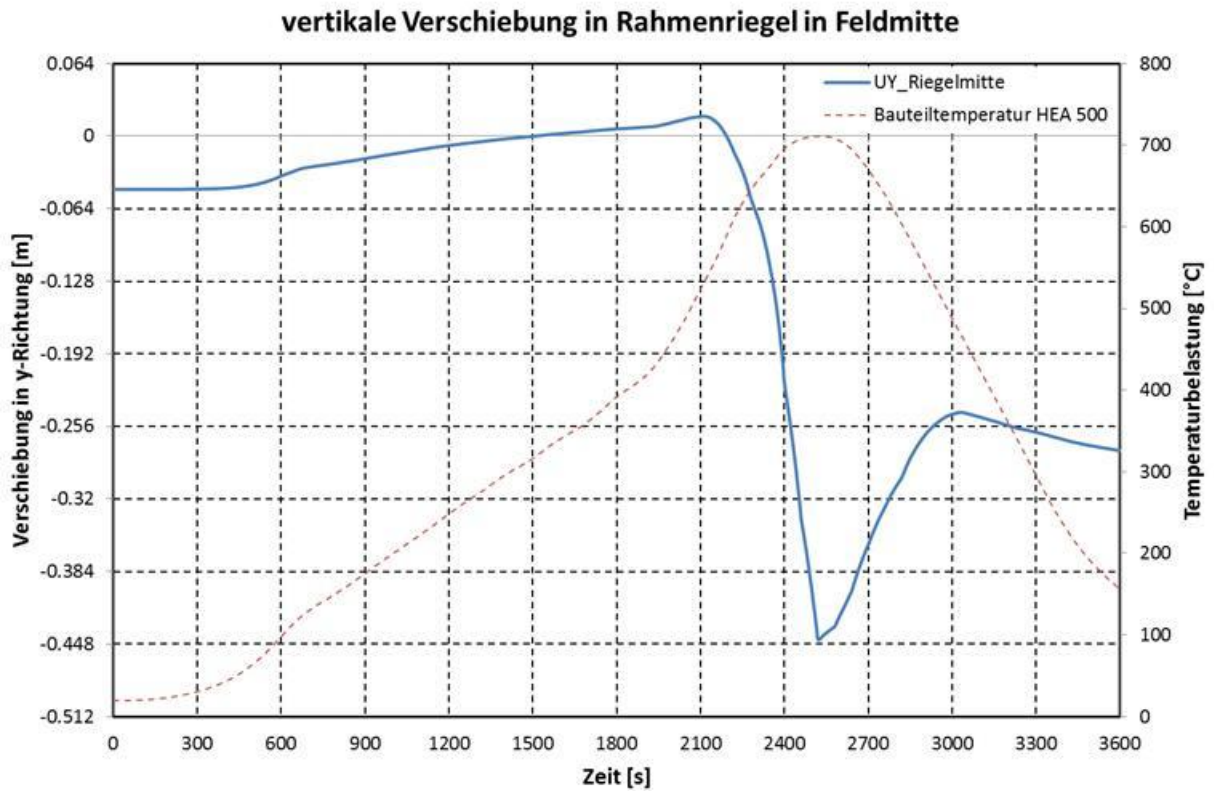


Bild A2.31 Vertikale Verschiebung des Untergurtes des Rahmenriegels in Feldmitte

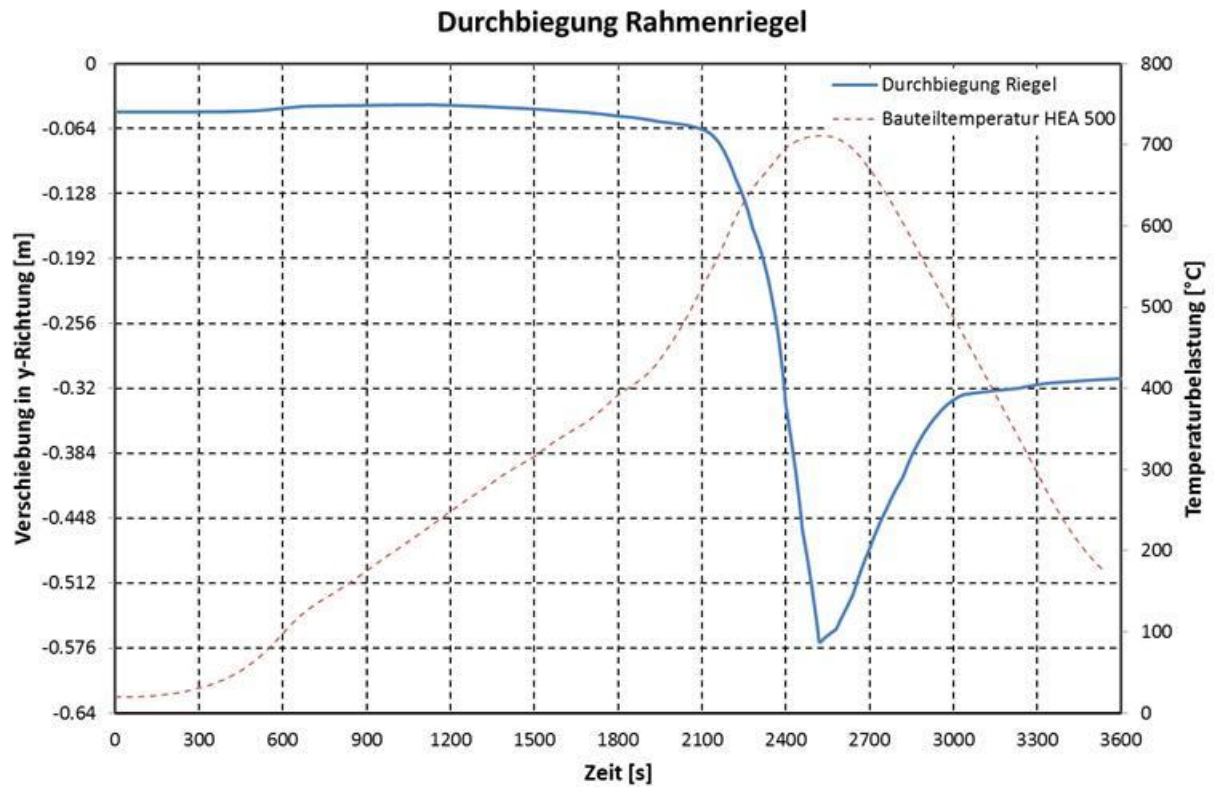


Bild A2.32 Tatsächliche Durchbiegung des Rahmenriegels in Feldmitte

Die Versagensbedingungen sind bei Anwendung des erweiterten Bemessungsverfahrens ingenieurmäßig festzulegen. Dabei ist auch das Trag- und Verformungsverhalten anschließender Bauteile (Trenn- und Zwischenwände, Unterdecken) zu berücksichtigen. Als Versagenskriterien können die Tragfähigkeit des Bauteils, die Größe der Verformungen und die Versagensgeschwindigkeit definiert werden (s. Kap. 6).

Für die Tragfähigkeit gilt:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

Bei der Festlegung der maximal zulässigen Verformung muss die raumabschließende Funktion der Bauteile berücksichtigt werden. Das Dach besteht aus Sandwichelementen, bei denen die Verformungen keinen großen Einfluss auf angrenzende massive Bauteile haben. Da die Finiten-Elemente definitionsgemäß infolge Temperatureinwirkung nicht versagen, kommt als Versagenskriterium zum einen das Abreißen der Befestigungsmittel vom Rahmenriegel aufgrund zu starker Längung der Elemente in Frage. Zum anderen kann es zum seitlichen Öffnen von Fugen zwischen den Sandwichelementen aufgrund der Längung des Rahmenriegels kommen. Dies würde jedoch nicht zu einem Herunterfallen der Elemente führen, sodass hier für diesen Schadensfall auch keine Verformungsgrenze eingehalten werden muss.

Als Versagenskriterium wird gemäß Kap. 6 das Kriterium gewählt, das in der DIN 4102-2 bzw. DIN EN 13501-2 für statisch bestimmt gelagerte, ganz oder vorwiegend durch Biegung beanspruchte Bauteile in den Bauteilprüfungen vorgesehen ist. Es legt eine kritische Durchbiegung sowie kritische Durchbiegungsgeschwindigkeit nach Gleichung (A2.38 und A2.39) fest

a) Durchbiegung: $D = L^2/(400 d)$ [mm] (A2.38)

b) Durchbiegungsgeschwindigkeit: $dD/dt = L^2/(9.000 d)$ [mm/min] (A2.39)

Dabei ist

L die lichte Spannweite, in mm;

d der Abstand, in mm, des äußersten Randes der Druckzone bis zum äußersten Rand der Zugzone des tragenden Querschnitts jeweils bei Kaltbemessung.

Das Kriterium der Durchbiegungsgeschwindigkeit gilt erst, nachdem eine Durchbiegung von $L/30$ überschritten wird.

Die maximale Durchbiegung des Rahmenriegels beträgt 570 mm.

Die kritische Durchbiegung beträgt

$$L^2/(400 d) = 28.300^2 / (400 \cdot 690) = 2900 \text{ mm} > 570 \text{ mm}$$

Die maximale Durchbiegungsgeschwindigkeit tritt kurz vor Erreichen der maximalen Temperatur auf. In Feldmitte beträgt die größte Differenz der Verschiebungen in y-Richtung zwischen zwei Zeitschritten von 60 s, wie in Bild A2.37 zu sehen $\Delta s = 126 \text{ mm}$. Dies muss erst ab einer Durchbiegung von $L/30$ betrachtet werden:

$$L/30 = 28.300 / 30 = 943 \text{ mm} > 570 \text{ mm}$$

Zur Vollständigkeit wird hier trotzdem der Nachweis der kritischen Durchbiegungsgeschwindigkeit gezeigt. Die kritische Durchbiegungsgeschwindigkeit beträgt

$$L^2 / (9.000 d) = 28.300^2 / (9000 \cdot 690) = 129 \text{ mm/min} > 126 \text{ mm/min}$$

Die kritische Durchbiegungsgeschwindigkeit wird im Laufe der Berechnung nicht erreicht. Der Nachweis über die Tragfähigkeit im Brandfall konnte daher mit Hilfe des erweiterten Bemessungsverfahrens erbracht werden.

Anschlüsse

Die Tragfähigkeit der Anschlüsse von Riegel und Stiel sind nach DIN EN 1993-1-2 [A2.15], Anhang D nachzuweisen, in dem die temperaturabhängigen Abminderungsfaktoren der Tragfähigkeit von Schrauben und Schweißnähten angegeben sind.

A2.6 Nachweise der Personensicherheit

A2.6.1 Zielsetzung

Das Hörsaalgebäude besitzt 20 Sitzreihen zu je 32 Plätzen, sodass 640 Sitzplätze vorhanden sind. Zu bestimmten Veranstaltungen muss noch mit bis zu 360 Personen zusätzlich im Raum gerechnet werden, die vor der ersten Sitzreihe bzw. auf den Stufen sitzen oder stehen. Es ist nachzuweisen, dass im Brandfall eine sichere Selbstrettung aller Personen aus dem Hörsaal heraus möglich ist. Dazu zählt der Nachweis, dass die erforderliche Zeitspanne bis zum Verlassen des Hörsaals ($t_{\text{Räumung}}$) wesentlich kleiner ist, als die Zeitspanne ($t_{\text{verfügbar}}$) bis zum Eintritt signifikanter Belastungen durch die Rauch- und Wärmeausbreitung. Weiterhin ist sicherzustellen, dass die sonstigen Bedingungen des Räumungsvorgangs zu keiner Personengefährdung führen. Der Hauptrettungsweg aus dem Hörsaal führt über einen 35 m langen Weg durch das Atrium ins Freie, wohingegen der § 7 (3) MVStättV [A2.2] nur 30 m Maximallänge vorsieht. Da alle übrigen Belange des Personenschutzes der MVStättV entsprechen, wird an dieser Stelle das durch die MVStättV erreichte Sicherheitsniveau mit den vorgegebenen Brandszenarien und mit Hilfe von Ingenieurmethoden bestimmt.

A2.6.2 Kriterien zum Nachweis der Schutzzielerfüllung

Für die zu untersuchenden Brandszenarien erweisen sich die Kriterien „Höhe der raucharmen Schicht“, „optische Dichte“ sowie die „Fractional Effective Dose“ (FED) relevant (Tabelle A2.12). Als Beurteilungswert für die raucharme Schicht wird 2,5 m über dem Boden angesetzt. Eine optische Dichte von 0,2 1/m entspricht einer Erkennungsweite von 10 bis 20 m (vgl. Tabelle 8.3).

Tabelle A2.12 Ausgewählte Kriterien zum Nachweis der Schutzzielerfüllung

Messgröße	Beurteilungswert	Bemerkung
raucharme Schichthöhe	2,5 m	nach [A2.3]
Optische Dichte	0,2 1/m	nach Kap. 8, Tab. 8.3 10 m bis 20 m
Fractional Effective Dose (FED)	0,3	0,1 - 0,3 nach [A2.20]

Die FED dient zur Bestimmung der unmittelbaren Beeinträchtigung einer Person bis zur Fluchtunfähigkeit durch Schadgase und Sauerstoffmangel und ist damit weit weniger konservativ als die zuvor genannten Kriterien. Entsprechend Kapitel 8 wird die integrale Wirkung von CO, falls vorhanden HCN, O₂-Mangel und CO₂ betrachtet. Bei Verwendung der FED sollte in jedem Fall die Primärliteratur, wie Purser [A2.21], hinzugezogen werden, in der z. B. auch eine Erweiterung der FED zur Berücksichtigung von Reizgasen vorgeschlagen wird. Die FED ist als dimensionslose Zahl definiert, die den Wert 1,0 erreicht, wenn die Schadwirkungen des Brandrauchs bei Personen Fluchtunfähigkeit hervorrufen. Da verschiedene Bevölkerungsgruppen aber sensibler reagieren, sollte eine FED von 0,1 bis 0,3 als Maß für die Fluchtunfähigkeit verwendet werden [A2.20], [A2.21]. Da zeit- und ortsabhängige Gaskonzentrationen von CFD-Modellen berechnet werden, bietet sich prinzipiell die Kopplung der FED-Berechnung mit den CFD-Ausgabedaten an.

A2.6.3 Brandszenarien und Simulation

Es wird angenommen, dass sich in Abhängigkeit der nachzuweisenden Leistungskriterien die in A2.3.3.4 beschriebenen Brandverläufe im Hörsaal einstellen.

Die Brandsimulation mit dem Modell Fire Dynamics Simulation (FDS) Version 6 erfolgte grundsätzlich wie in A2.4 für die Ermittlung der Brandwirkungen für die Tragwerksbemessung beschrieben. Abweichend erfolgte die Simulation wegen der deutlich kürzeren Betrachtungszeiträume mit einem Knotenabstand von 25 cm. Die für die Auswertung entscheidenden Messpunkte der Leistungskriterien wurden im Hörsaal auf der obersten Ebene auf dem rechten und linken Stufengang vor der Wandscheibe abgegriffen (Bild A2.31). Gaszusammensetzungen für die optische Dichte und die FED wurden in 1,75 m Höhe aufgenommen. Entsprechend der angenommenen Brandlast wurde in FDS eine einfache Verbrennungsreaktion von Holz mit einer Ausbeute von Ruß von 0,015 g/g und Kohlenmonoxid (CO) von 0,004 g/g verwendet (vgl. Tabelle 8.4 für die brandlastgesteuerte Verbrennung von zelluloseartigen Brandlasten). Daraus resultiert der effektive Heizwert von 17.247 kJ/kg. Da die Brandlasten keine relevanten Mengen an Stickstoff beinhalten, wird davon ausgegangen, dass im Brand kein HCN (Cyanwasserstoff, Blausäuregas) entsteht (vgl. [A2.20]).

Um einen unrealistischen brandbedingten Druckanstieg im Gebäude auszuschließen, wurden die unten befindlichen Notausgangstüren als Druckentlastungsöffnung berücksichtigt.

Das Hörsaalgebäude verfügt beidseitig im oberen Bereich über vier je 8 m² große RWA-Öffnungen (rechnerisch 3,4 % der Grundfläche), die ggf. geöffnet werden (Bild A2.33).

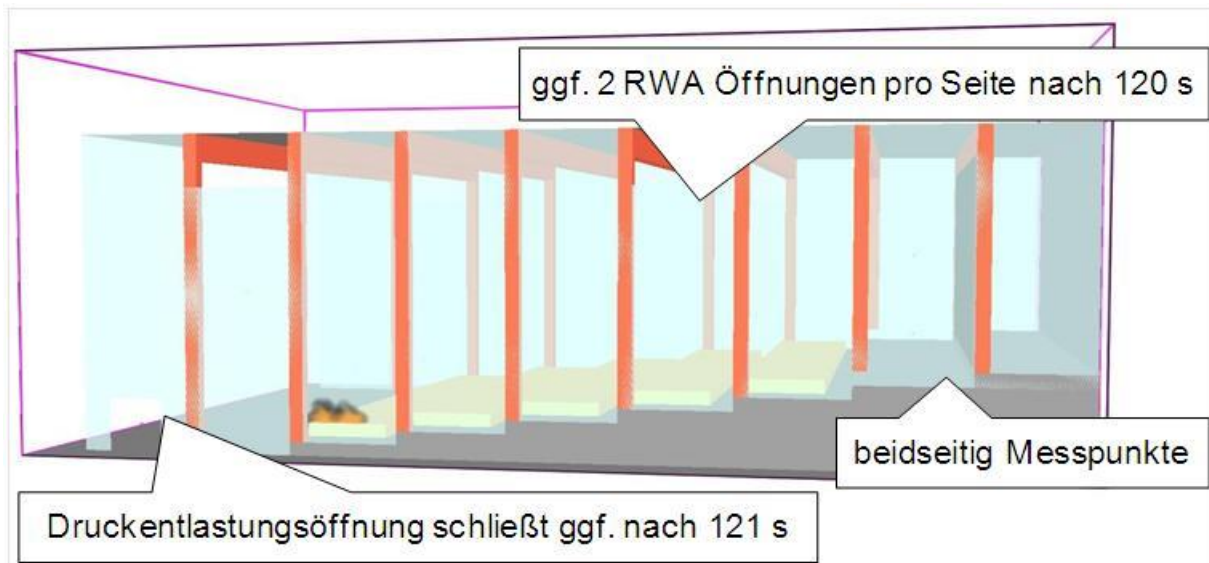


Bild A2.33 Hörsaalmodell für die Berechnung mit FDS Vers. 6 zur 121. Sekunde

A2.6.3.1 Brand im Hörsaal zum Nachweis der raucharmen Schichthöhe bzw. optischen Dichte („Behinderung der Flucht“)

Für diesen Nachweis wird ein quadratischer Anstieg der Wärmefreisetzungsrate mit einer Zeit von 150 s bis zum Erreichen von 1 MW angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass anlagentechnische Maßnahmen auslegungsgemäß wirksam werden. Vorstudien ergaben, dass für den Zeitverlauf der Wärmefreisetzungsrate nach Gleichung (A2.43) deckenmontierte Rauchmelder auch bei einer Rauchausbeute von nur 0,001 g/g innerhalb von 60 s auslösen. Aufgrund einer maximalen Öffnungszeit von RWA-Geräten von 60 s wird davon ausgegangen, dass nach 120 s die Abzugsflächen zur Verfügung stehen. Da bei einer Auslegung gemäß MVStättV keine Anforderungen an Nachströmöffnungen gestellt werden, werden diese nicht modelliert und die Notausgangstüren als Druckausgleichsöffnung schließen nach der 121. Sekunde. Die Tabelle A2.13 zeigt die Zeiten bis zum Erreichen der Schutzzielkriterien (Tabelle A2.13) an den relevanten Messpunkten (vgl. Bild A2.33).

Das Kriterium „raucharme Schichthöhe“ wird schon nach relativ kurzer Zeit überschritten. Die Verdünnung des Brandrauchs ist allerdings durch die großen eingemischten Luftmengen relativ hoch, sodass das Kriterium „optische Dichte“ erst deutlich später durchschritten wird.

Tabelle A2.13 Zeiten in Sekunden bis zur Nichteinhaltung der Beurteilungswerte für das Szenario mit Öffnen der Rauchabzüge nach 120 s

Messpunkt	Optische Dichte in 1,75 m Höhe $\geq 0,2$ 1/m	raucharme Schichthöhe $\leq 2,5$ m
vor der Wandscheibe li./re.	380 s / 383 s	205 s / 207 s

A2.6.3.2 Brand im Hörsaal zum Nachweis der Fractional Effective Dose (FED) („Verhinderung der Flucht“)

Für diesen Nachweis wird ein quadratischer Anstieg der Wärmefreisetzungsrate mit einer Zeit von $150 \text{ s} / 1,4 = 107 \text{ s}$ bis zum Erreichen von 1 MW angenommen. Es wird konservativ davon ausgegangen, dass anlagentechnische Maßnahmen nicht wirksam werden. Die Tabelle A2.14 stellt die Ergebnisse für den relevanten Messpunkt vor der Wandscheibe dar. Die FED von 0,3 wird für dieses sehr konservative Szenario nach 717 s bzw. 730 s überschritten.

Tabelle A2.14 Zeiten in Sekunden bis zur Nichteinhaltung der Schutzzielkriterien für das Szenario ohne Öffnen der Rauchabzüge

Messpunkt	FED in 1,75 m Höhe $\geq 0,3$
vor der Wandscheibe li./re.	730 s / 717 s

Die FED gibt im Gegensatz zu den herkömmlichen, rein physikalischen Kriterien die akute Brandgastoxizität wieder. Sie ist nicht dazu geeignet, die vorgenannten Kriterien zu ersetzen, sondern stellt eine aussagekräftige Ergänzung dar. Wenn an Stelle der hölzernen Hörsaalbestuhlung beispielsweise Sitze mit Polsterung aus PU und Konstruktionselemente aus PVC in Brand geraten, hat dies praktisch keinen Einfluss auf die Höhe der raucharmen Schicht und nur geringen Einfluss auf die Erkennungsweite, sodass die tatsächliche Gefahrenerhöhung nicht widerspiegelt wird. Nur die FED wird hierdurch merklich beeinflusst, da höhere und zusätzliche Schadstoffausbeuten auftreten. Bild A2.34 zeigt den Verlauf der FED am Messpunkt auf dem linken Stufengang vor der Wandscheibe für das Szenario ohne RWA.

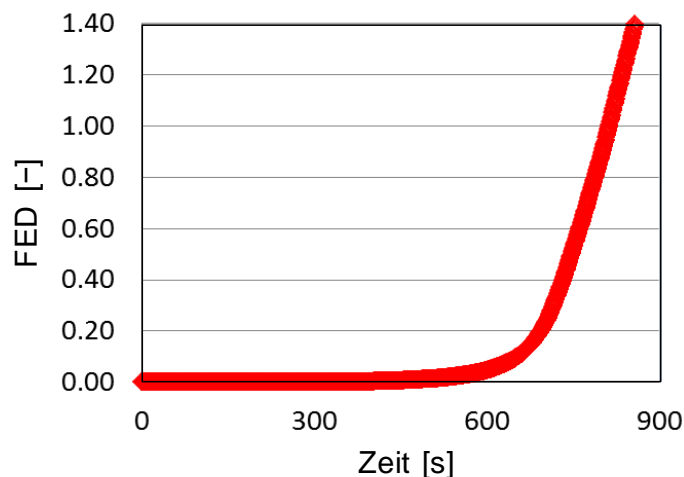


Bild A2.34 Verlauf der FED am Messpunkt auf dem linken Stufengang vor der Wandscheibe

A2.6.4 Modellierung der Räumung

A2.6.4.1 Auslegungsgrundlagen

Das Hörsaalgebäude mit den Abmessungen 34 m x 29 m x 12 m (L x B x H) ist mit 20 Sitzreihen zu je 32 Plätzen ausgestattet. Bei Sonderveranstaltungen können sich zusätzlich zu den

640 Personen auf den Sitzplätzen weitere Besucher auf den Stufengängen bzw. vor den Sitzreihen aufhalten, sodass sich als Bemessungsgrundlage insgesamt 1000 Personen im Hörsaal befinden. Die leicht ansteigenden Sitzreihen werden durch zwei Seitenstufengänge und zwei Mittelstufengänge erschlossen. Hinter den Sitzreihen befindet sich eine Wandscheibe mit vier Durchgängen, durch die man von den Stufengängen über eine Vorfläche zu den beiden nebeneinander liegenden Hauptzugangstüren des Hörsaals gelangt. Die Türen führen auf die erste Ebene eines angeschlossenen Foyergebäudes. Dort führt eine Treppe hinunter in das Erdgeschoss mit Ausgängen ins Freie (Bild A2.35). Der zweite Rettungsweg ist durch zwei vorne angeordnete Ausgangstüren links und rechts des Podiums gegeben (Bild A2.36).

Die Rettungswege aus dem Hörsaal sind gemäß MVStättV [A2.2] ausgelegt: Die Besucherzahl von knapp 1000 Personen erfordert nach MVStättV eine Fluchtwegbreite von zehn Modulen zu je 0,60 m, entsprechend einer freien Gesamtbreite von 6,00 m. Diese Anforderungen werden durch die zwei Hauptzugänge und die Notausgänge von jeweils 2 m Breite abgedeckt (12 Module, 8 m Gesamtbreite). Die Öffnungen in der Wandscheibe sowie die vier Stufengänge decken die Rettungswegbreite ebenfalls ab. Die maximale Länge der Rettungswege bis zum Erreichen eines sicheren Bereichs (das Foyer bzw. das Freie) wird ebenfalls eingehalten.

Es wird die Räumung über die Hauptausgänge (Rettungsweg 1) und Notausgänge (Rettungsweg 2) betrachtet. Um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede, die sich bei der Anwendung verschiedener in der Praxis häufig eingesetzter Modelle ergeben herauszuarbeiten, wurden die in Tabelle A2.15 genannten Modelle in der angegebene Grundeinstellung eingesetzt. Für die Grundeinstellungen wurden, soweit mit der Definition der Szenarien verträglich, die Vorgabewerte der jeweiligen Computerprogramme benutzt.

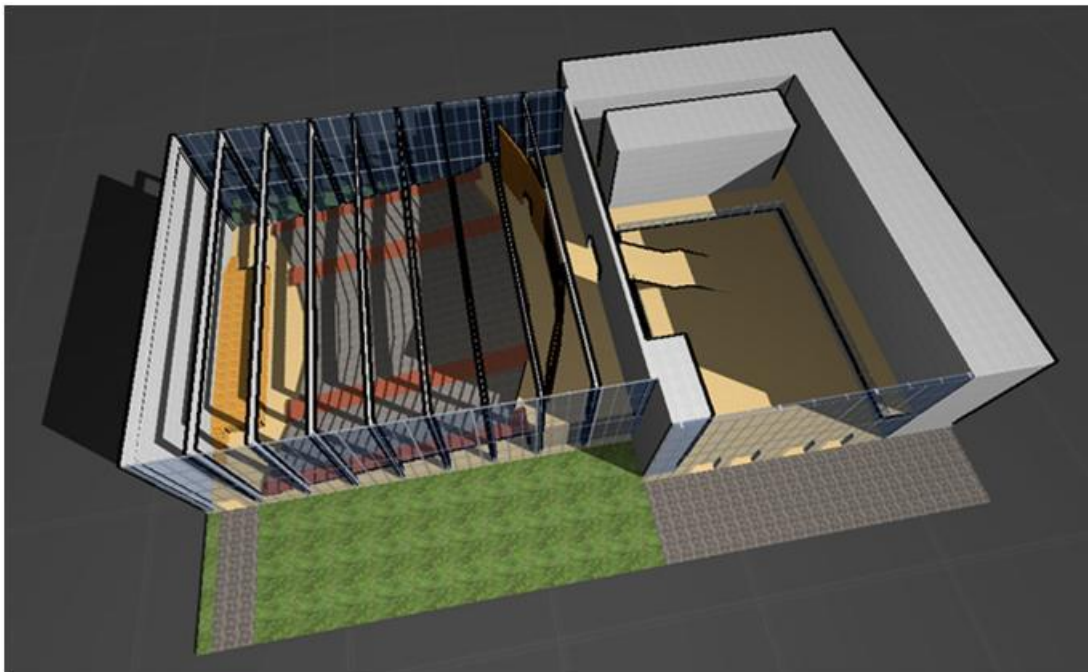


Bild A2.35 Blick auf den Hörsaal und das Foyer

Tabelle A2.15 Übersicht der verwendeten Modelle

Typ	Modell
Kapazitätsanalyse	Kapazitätsanalyse nach vfdb-Leitfaden „moderate“ Auslastung
dynamisches Strömungsmodell	Predtetschenski und Milinski [A2.22] („Übergangsstraßenkleidung“, „Normalbedingungen“)
diskretes Individualmodell	buildingEXODUS (Version 4.00) [A2.23] (Standardpopulation)
diskretes Individualmodell	PedGo (Version 2.5) [A2.24] (Standardpopulation)
kontinuierliches Individualmodell	FDS+Evac (Vers.: FDS 5.5.3, Evac 2.3.1) [A2.25] (Standardpopulation „adult“)
kontinuierliches Individualmodell	ASERI (Version 4.8) [A2.26] („Räumung“, inhomogene Population gemäß Grundeinstellungen)

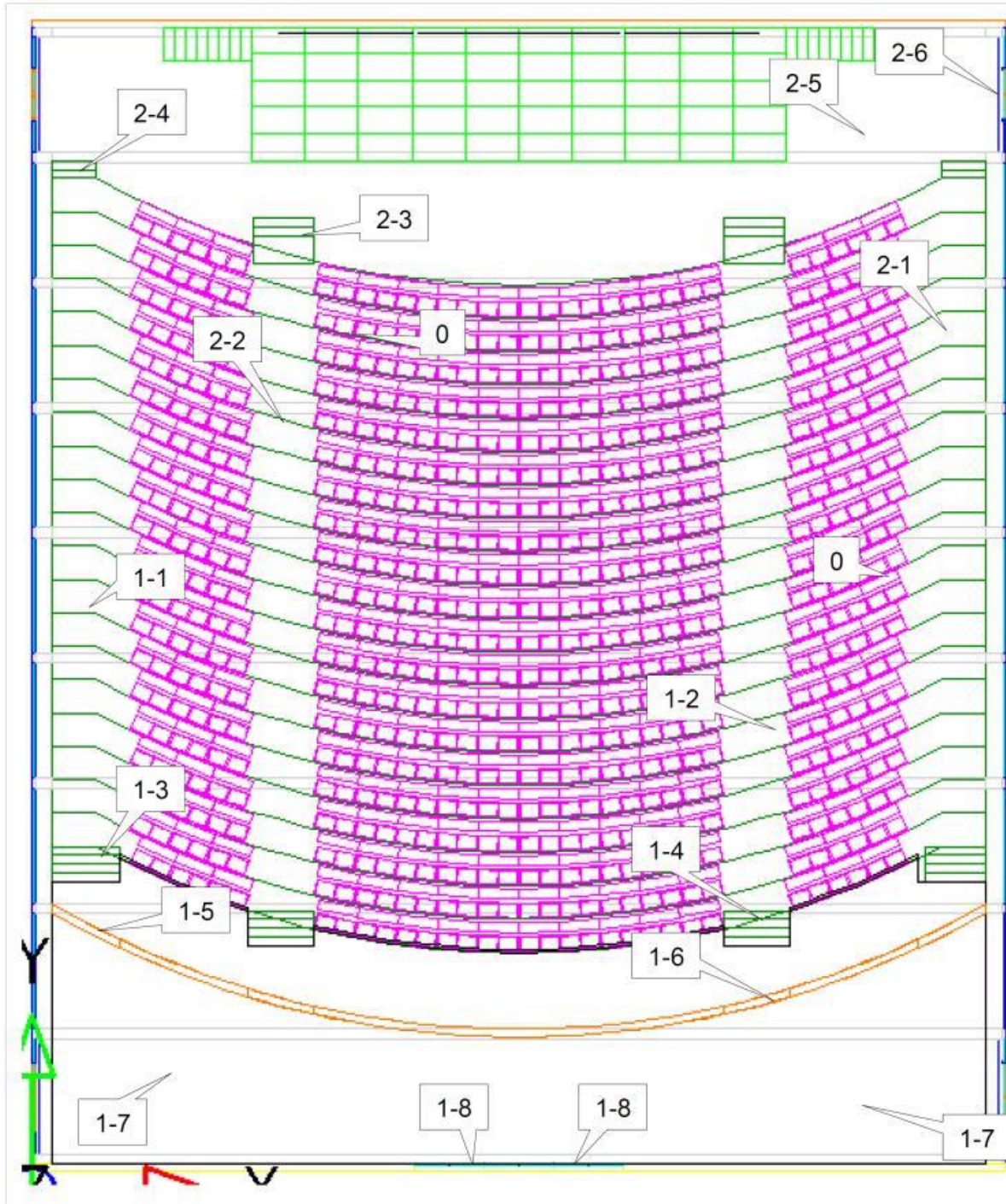


Bild A2.36 Draufsicht des Hörsaals mit Bezeichnung der Wegelemente beider Rettungswege (0) sowie des ersten und des zweiten Rettungsweges (1-i bzw. 2-i)

A2.6.4.2 Vorgehensweise

Es wird für dieses Anwendungsbeispiel vergleichend ein Brandausbruch im Hörsaal untersucht.

Die Räumungszeit $t_{\text{Räumung}}$ ist nach Gleichung (9.2) definiert als die Summe der Zeitspannen $t_{\text{Detektion}}$, t_{Alarm} , t_{Reaktion} und t_{Flucht} .

Die Zeitspannen $t_{\text{Detektion}}$ und t_{Alarm} hängen von der Brandentwicklungsgeschwindigkeit und dem Ort der Brandentstehung ab. Bei Brandausbruch im Hörsaal gehen $t_{\text{Detektion}}$ und t_{Alarm} in t_{Reaktion} auf.

Für die Reaktionszeiten t_{Reaktion} der Personen, die einen bedeutenden Anteil an der Gesamtdauer $t_{\text{Räumung}}$ haben können, wird in Kapitel 9 die von Purser [A2.20] entwickelte Vorgehensweise vorgeschlagen, in der von einer Verteilung der individuellen Reaktionszeiten ausgegangen wird. Der Hörsaal fällt unter die Gebäudekategorie B (Benutzer sind *wach, unvertraut* mit dem Gebäude und es herrscht eine *hohe Personendichte*). Die Gebäudekomplexität wird wegen der im Hörsaal leicht zu erkennenden Lage der Ausgänge als „*einfacher Grundriss mit mehreren Räumen (auch mehrgeschossig), Bauweise entspricht überwiegend präskriptiven Vorgaben*“ in die Kategorie B2 eingestuft. Es sei ein Alarmierungssystem entsprechend der Kategorie A2 „*zweistufiges automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung einer Zentrale und nachgeschalteter zeitverzögerter Alarmierung der betroffenen Bereiche*“ vorhanden und wirksam. Zudem kann von einer direkten Alarmierung der Anwesenden durch den Brand ausgegangen werden. Der letzte Parameter M für das Brandschutzmanagement nach Tabelle 9.4 hat einen bedeutenden Einfluss auf die resultierende Reaktionszeit. Nur für die über den erforderlichen Mindeststandard hinausgehenden Kategorien M1 oder M2, für die u. a. ein Lautsprechersystem und gegebenenfalls geschultes Personal erforderlich ist, lassen sich verlässliche Reaktionszeiten festlegen. So ergibt sich aus Tabelle 9.5 für Kategorie M1 $\Delta t_1 = 1 \text{ min}$ und $\Delta t_{99} = 2 \text{ min}$ und somit ein Reaktionszeit-Intervall von 1 min bis 3 min.

Da in diesem Beispiel der Vergleich der Modelle im Vordergrund steht und makroskopische Modelle keine individuelle Reaktionszeit berücksichtigen können, wird im Weiteren eine mittlere Reaktionszeit von 2 min angenommen. Diese ist konsistent mit dem Brandszenario in A2.3.2, 2 min nach Entzündung brennt das Feuer dort auf $3,1 \text{ m}^2$ mit einer Leistung von 675 KW. Es ist davon auszugehen, dass unter diesen Umständen die Fluchtbewegung bei allen Anwesenden eingesetzt hat. Durch den Bezug zum Brandszenarium schließt dieser Zeitraum die Zeiten $t_{\text{Detektion}}$ und t_{Alarm} ein. Folglich ist für die Bestimmung der Räumungszeit zu der Bewegungszeit, deren Berechnung nachfolgend beschrieben wird, eine Reaktionszeit von 2 min zu addieren.

A2.6.4.3 Berechnung der Bewegungszeiten

Der letzte Summand der Gl. (9.2) ist die Dauer der Fluchtbewegung bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches t_{Bewegung} . Im Folgenden werden die eingesetzten Modelle mit ihren für dieses Szenario spezifischen Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen kurz erläutert und die erzielten Resultate gegenübergestellt. Weitere Details zu den Modellrechnungen findet man in [A2.29].

Kapazitätsanalyse

Die Fluchtbewegung der Personen aus dem Hörsaal erfolgt über verschiedene Wegelemente, für die aus empirischen Untersuchungen Daten über die spezifische Durchlasskapazität (Fluss, meist in $\text{P}/(\text{m} \cdot \text{s})$) in Abhängigkeit der Personendichte (P/m^2) vorliegen [A2.30]. Für die hier betrachteten Szenarien sind als Wegelemente (Bild A2.36) die Gänge zwischen den Sitzreihen, die Stufengänge, die Treppen auf- und abwärts, die Engstellen verschiedener Breite

und die horizontalen Wege zu betrachten. Durch Annahme eines homogenen Personenverhaltens und eines stationären Personenstroms erhält man zusammen mit Vorgaben zur Rettungswegwahl die Bewegungszeiten für die letzten Personen, die über einen der jeweiligen Rettungswege flüchten.

In Tabelle A2.16 sind die im Fluchtweg befindlichen Wegelemente entsprechend ihrer Lage im ersten (1-i) bzw. zweiten Fluchtweg (2-i) aufgelistet sowie mit ihren zugehörigen freien Durchgangsbreiten (Sp. 4) und maximalen Weglängen (Sp. 8) versehen. Auf Grund der Gebäudenutzung als Hörsaal wird von einem gemäßigten Personenverhalten ausgegangen und den Wegelementen die spezifischen Flüsse (Sp. 5) und Gehgeschwindigkeiten (Sp. 9) der Tabelle 9.6 für „moderate Auslastung“ ($D \approx 1 \text{ P/m}^2$) zugeordnet. Diese Dichte ist gegenüber der in Tabelle 9.6 alternativen „optimalen Auslastung“ ($D \approx 2 \text{ P/m}^2$) wegen der geringeren Größe des Flusses konservativ.

Der Fluss (Sp. 6) ist das Produkt aus freier Durchgangsbreite (Sp. 4) und spezifischem Fluss (Sp. 5). Der gesamte Fluss (Sp. 7) ist das Produkt aus dem Durchfluss und der Anzahl der parallelen Wegelemente im Fluchtweg (Sp. 3). Die Laufzeit (Sp. 10) ist der Quotient aus maximaler Länge (Sp. 8) und Gehgeschwindigkeit (Sp. 9).

Für den ersten Rettungsweg beträgt die Laufzeit für den Kopf des Personenstroms über die seitlichen Stufengänge (Wegelement Nr. 1-1, ca. 8,3 s für die oberen 5 m) die Treppe (Nr. 1-3, 2,5 s), die Engstelle (Nr. 1-5, 0,3 s), den horizontalen Weg (Nr. 1-7, 15 s) und schließlich durch eine Eingangstür (Nr. 1-8, 0,5 s) ins gesicherte Foyer $t_{\text{Laufzeit-1}} = 26,6 \text{ s}$. Der Hauptteil des Personenstroms muss sich durch das Wegelement mit dem geringsten Gesamtfluss (Sp. 7) hindurchbewegen und benötigt dazu die Zeit $t_{\text{Engpass-1}}$. Da die Elemente 1-1 und 1-2, 1-3 und 1-4 sowie 1-5 und 1-6 jeweils parallel durchströmt werden, sind die beiden Türen (Nr. 1-8) mit einem Gesamtfluss von 3,60 P/s der Engpass. Die 1000 Personen benötigen zum Durchströmen $t_{\text{Engpass}} = 1000 \text{ P} / 3,60 \text{ P/s} = 277,8 \text{ s}$. Die Bewegungszeit als Summe von t_{Laufzeit} und t_{Engpass} beträgt $t_{\text{Bewegung-1}} = 304 \text{ s}$.

Für den zweiten Rettungsweg beträgt die Laufzeit für den Kopf des Personenstroms über die seitlichen Stufengänge (Nr. 2-1, ca. 8,3 s für die unteren 5 m) die Treppe (Nr. 2-4, 1,2 s), den horizontalen Weg (Nr. 2-6, 10 s) und schließlich durch eine Notausgangstür (Nr. 2-6, 0,5 s) $t_{\text{Laufzeit-2}} = 20,0 \text{ s}$. Die Notausgangstüren weisen mit 3,6 P/s (Sp. 7) den geringsten Gesamtfluss auf. Die 1000 Personen benötigen zur Passage wiederum die Zeit $t_{\text{Engpass-2}} = 277,8 \text{ s}$. Die Bewegungszeit als Summe von t_{Laufzeit} und t_{Engpass} beträgt $t_{\text{Bewegung-2}} = 298 \text{ s}$.

Tabelle A2.16 Eigenschaften der zu passierenden Wegelemente bei Räumung des Hörsaals. Bewegungsparameter für „moderate Auslastung“ aus Kapitel 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nr.	Wegelement	Anzahl im Rettungsweg	Durchgangsbreite [m]	spez. Durchlasskapazität [P/(m*s)]	Durchlasskapazität [P/(s)]	ges. Durchlasskapazität [P/(s)]	max. Länge [m]	Gehgeschwindigkeit [m/s]	Laufzeit [s]
0	Gang zwischen den Sitzreihen	120	0,42	- ¹	0,63 ¹	75,60	-	-	-
1-1	seitl. Stufengang aufwärts ²	2	1,20	0,8	0,96	1,92	10,0	0,6	16,7
1-2	Mittelstufengang aufwärts ²	2	1,80	0,8	1,44	2,88	10,0	0,6	16,7
1-3	Treppe zwischen seitl. Stufengang und Wandscheibe	2	1,60	0,8	1,28	2,56	1,5	0,6	2,5
1-4	Treppe zwischen Mittelstufengang und Wandscheibe	2	2,00	0,8	1,60	3,20	1,5	0,6	2,5
1-5	seitl. Engstelle in der Wandscheibe	2	1,40	0,9	1,26	2,52	0,3	1,0	0,25
1-6	Tür in der Wandscheibe für Mittelstufengang	2	2,00	0,9	1,80	3,60	0,3	1,0	0,25
1-7	Weg zwischen Wandscheibe und Eingangstüren ³	4	2,50	1,1	2,75	11,00	15,0	1,0	15,0
1-8	Eingangstür	2	2,00	0,9	1,80	3,60	0,5	1,0	0,5
1-9	Treppe im Foyer ⁴	2	2,40	0,8	1,92	3,84	15,0	0,6	25,0
2-1	seitl. Stufengang abwärts ²	2	1,20	0,8	0,96	1,92	10,0	0,6	16,7
2-2	Mittelstufengang abwärts ²	2	1,80	0,8	1,44	2,88	10,0	0,6	16,7
2-3	Treppe von Mittelstufengang nach vorne	2	2,00	0,8	1,60	3,20	0,7	0,6	1,17
2-4	Treppe von den seitl. Stufengang nach vorne	2	1,20	0,8	0,96	1,92	0,7	0,6	1,17

2-5	Weg zwischen Treppe und Notausgang	4	1,20	1,1	1,32	5,28	10,0	1,0	10,0
2-6	Notausgangstür vorne	2	2,00	0,9	1,80	3,60	0,5	1,0	0,5
<p>¹ Die Kapazität zwischen den Reihen ist unabhängig von der Breite. Nach [A2.22] für „normale“ Bewegung für Personen in „Übergangsstraßenkleidung“.</p> <p>² Stufengänge werden konservativ als Treppe mit den gleichen Bewegungsparametern aufwärts und abwärts betrachtet.</p> <p>³ Falls der Bereich zwischen Wandscheibe und Ausgang für Ausstellungen etc. benutzt wird, muss die Mindestbreite sichergestellt sein.</p> <p>⁴ Die Treppe ist gem. [A2.2] mittig durch einen zweiläufigen Handlauf geteilt.</p>									

Tabelle A2.17 P&M, 1. RW – Parameter der Wegelemente für „Normalbedingungen“ bei einer Projektionsfläche von 0,113 m²/P

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Weg entlang der seitlichen Stufengänge																		
Nr.	Bezeichnung und Lage des Wegelements	Anz.	Personen im Rettungsweg	max. Lauflänge [m]	freie Durchgangsbreite [m]	Dichte [P/m ²]	Dichte [m ² /m ³]	erf. spez. Fluss [P/(m ² s)]	erf. spez. Fluss [m ² /(m ² min)]	spez. Fluss [P/(m ² s)]	spez. Fluss [m ² /(m ² min)]	Gesamtfluss [P/s]	Gesamtfluss [m ² /min]	Geschw [m/s]	Geschw [m/min]	Stauzeit [s]	Stauzeit [s]	Laufzeit [s]
0	Gang zwischen den Sitzreihen	20	200		0.42					f		12.60	85.43					
1-1	seitl. Stufengang aufwärts	1	200	2.5	1.20	8.14	0.920	10.50	71.19	0.89	6.06	1.07	7.27	0.11	6.58	186.5	186.5	22.8
1-3	Treppe zwischen seitl. Stufengang und Wandschleibe	1	200	1.5	1.60	2.04	0.230	0.67	4.55	0.67	4.55	1.07	7.27	0.33	19.73			4.6
1-5	Engstelle an der Wandschleibe	1	200	0.3	1.40	0.97	0.110	0.77	5.19	0.77	5.19	1.07	7.27	0.78	46.88			0.3
1-7	Weg zwischen Wandschleibe und Eingangstüren	1	200	15.0	2.50	0.58	0.065	0.43	2.91	0.43	2.91	1.07	7.27	1.46	87.80			10.3
1-8	Eingangstür	1	200	0.5	0.90	2.35	0.265	1.19	8.08	1.19	8.08	1.07	7.27	0.51	30.48			1.0
Weg entlang der mittleren Stufengänge																		
Nr.	Bezeichnung und Lage des Wegelements	Anz.	Personen im Rettungsweg	max. Lauflänge [m]	freie Durchgangsbreite [m]	Dichte [P/m ²]	Dichte [m ² /m ³]	erf. spez. Fluss [P/(m ² s)]	erf. spez. Fluss [m ² /(m ² min)]	spez. Fluss [P/(m ² s)]	spez. Fluss [m ² /(m ² min)]	Gesamtfluss [P/s]	Gesamtfluss [m ² /min]	Geschw [m/s]	Geschw [m/min]	Stauzeit [s]	Stauzeit [s]	Laufzeit [s]
0	Gang zwischen den Sitzreihen	20	300		0.42					f		12.60	85.43					
1-2	Mittelstufengang	1	300	2.5	1.80	8.14	0.920	7.00	47.46	0.89	6.06	1.61	10.91	0.11	6.58	186.5	186.5	22.8
1-4	Treppe zwischen seitl. Stufengang und Wandschleibe	1	300	1.5	2.00	3.27	0.370	0.80	5.45	0.80	5.45	1.61	10.91	0.24	14.68			6.1
1-6	Engstelle an der Wandschleibe	1	300	0.3	2.00	1.06	0.120	0.80	5.45	0.80	5.45	1.61	10.91	0.76	45.49			0.3
1-7	Weg zwischen Wandschleibe und Eingangstüren	1	300	4.0	2.50	1.06	0.120	0.64	4.36	0.64	4.36	1.61	10.91	0.61	36.58			6.6
1-8	Eingangstür	1	300	0.5	1.10	4.42	0.500	1.46	9.92	1.46	9.92	1.61	10.91	0.33	19.83			1.5
Zusammenfluss im Foyer																		
1-9	Treppe im Foyer	1	500		2.40	8.14	0.920	1.12	7.58	0.65	4.44	1.57	10.66	0.08	4.83			318.1

Tabelle A2.18 P&M, 2. RW – Parameter der Wegelemente für „Normalbedingungen“ bei einer Projektionsfläche von 0,113 m²/P

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Weg entlang der seitlichen Stufengänge																		
Nr.	Bezeichnung und Lage des Wegelements	Anz.	Personen im Rettungsweg	max. Lauflänge [m]	freie Durchgangsbreite [m]	Dichte [P/m ²]	Dichte [m ² /m ²]	erf. spez. Fluss [P/(m ² s)]	erf. spez. Fluss [m ² /(m ² min)]	Stau	spez. Fluss [P/(m ² s)]	spez. Fluss [m ² /(m ² min)]	Gesamtfluss [P/s]	Gesamtfluss [m ² /min]	Geschw [m/s]	Geschw [m/min]	Stauzeit [s]	Laufzeit [s]
0	Gang zwischen den Sitzreihen	20	200		0.42						f		12.60	85.43				
2-1	seiti. Stufengang abwärts	1	200	2.5	1.20	8.14	0.920	10.50	71.19	Stau	0.65	4.44	0.79	5.33	0.08	4.83	254.5	31.1
2-4	Treppe vom seiti. Stufengang nach vorne	1	200	0.7	1.20	8.14	0.920	0.65	4.44		0.65	4.44	0.79	5.33	0.08	4.83		8.7
2-5	Weg zwischen Treppe und Notausgang	1	200	10.0	1.20	1.11	0.125	0.65	4.44		0.65	4.44	0.79	5.33	0.60	36.00		16.7
2-6	Notausgang	1	200	0.5	1.00	1.02	0.115	0.79	5.33		0.79	5.33	0.79	5.33	0.77	46.18		0.6
Weg entlang der mittleren Stufengänge																		
Nr.	Bezeichnung und Lage des Wegelements	Anz.	Personen im Rettungsweg	max. Lauflänge [m]	freie Durchgangsbreite [m]	Dichte [P/m ²]	Dichte [m ² /m ²]	erf. spez. Fluss [P/(m ² s)]	erf. spez. Fluss [m ² /(m ² min)]	Stau	spez. Fluss [P/(m ² s)]	spez. Fluss [m ² /(m ² min)]	Gesamtfluss [P/s]	Gesamtfluss [m ² /min]	Geschw [m/s]	Geschw [m/min]	Stauzeit [s]	Laufzeit [s]
0	Gang zwischen den Sitzreihen	20	300		0.42						f		12.60	85.43				
2-2	Mittelstufengang	1	300	2.5	1.80	8.14	0.920	7.00	47.46	Stau	0.65	4.44	1.18	7.99	0.08	4.83	254.5	31.1
2-3	Treppe vom Mittelstufengang nach vorne	1	300	1.5	2.00	0.84	0.095	0.59	4.00		0.59	4.00	1.18	7.99	0.71	42.63		2.1
2-5	Weg zwischen Treppe und Notausgang	1	300	10.0	1.20	2.79	0.315	0.98	6.66		0.98	6.66	1.18	7.99	0.35	20.93		28.7
2-6	Notausgang	1	300	0.5	1.00	2.26	0.255	1.18	7.99		1.18	7.99	1.18	7.99	0.52	31.24		1.0

Dynamisches Strömungsmodell nach Predtetschenski und Milinski

Im Rahmen des hydraulischen Ansatzes berücksichtigen die dynamischen Strömungsmodelle die Tatsache, dass sich im Verlauf einer Personenströmung über die Wegstrecke wechselnde Personendichten und daraus resultierend wechselnde Gehgeschwindigkeiten und Durchlasskapazitäten ergeben. Dieser Zusammenhang wird auch als Fundamentaldiagramm bezeichnet. In dem Ansatz nach Predtetschenski und Milinski (P&M) [A2.22] wird zur Berücksichtigung verschiedener Personengruppen eine Projektionsfläche eingeführt, sodass die Personendichte nicht in $[P/m^2]$, sondern in $[m^2/m^2]$ angegeben wird.

Unter der Annahme, dass die Gruppe aus Personen in „Übergangsstraßenkleidung“ besteht, beträgt die durchschnittliche Projektionsfläche $0,113 m^2/P$, sodass für den Zusammenhang zwischen Personendichte und Gehgeschwindigkeit (a) bzw. Personenfluss (b) die Fundamentaldiagramme nach Bild A2.37a+b gelten.

Um die sich im Modell [A2.22] einstellende Personendichte in $[m^2/m^2]$ zu erhalten, wird von einem spezifischen Fluss („Bewegungsintensität“) q_i am Wegelement i ausgegangen, der sich aus der Dichte D mal der Geschwindigkeit v zusammensetzt.

$$q_i = D \cdot v \quad (A2.40)$$

Es wird davon ausgegangen, dass der Fluss q_{i+1} im nächsten Wegelement $i+1$ aus dem Verhältnis der Wegbreiten b den Wert

$$q_{i+1} = q_i \cdot \frac{b_i}{b_{i+1}} \quad (A2.41)$$

einnimmt. Entsprechend der im Bild A2.37 dargestellten Zusammenhänge ergeben sich aus dem Fluss q_{i+1} für das Wegelement $i+1$ eine neue Dichte und Gehgeschwindigkeit. Falls das Wegelement $i+1$ den durch die Wegbreitenveränderung erforderlichen spezifischen Fluss q_{i+1} nicht abdecken kann, kommt es zum Stau und es wird mit den Werten für maximale Dichte weitergerechnet. Das Verfahren ist etwas komplexer als die einfache Kapazitätsanalyse, doch lassen sich die Rechenschritte auch teilweise automatisieren.

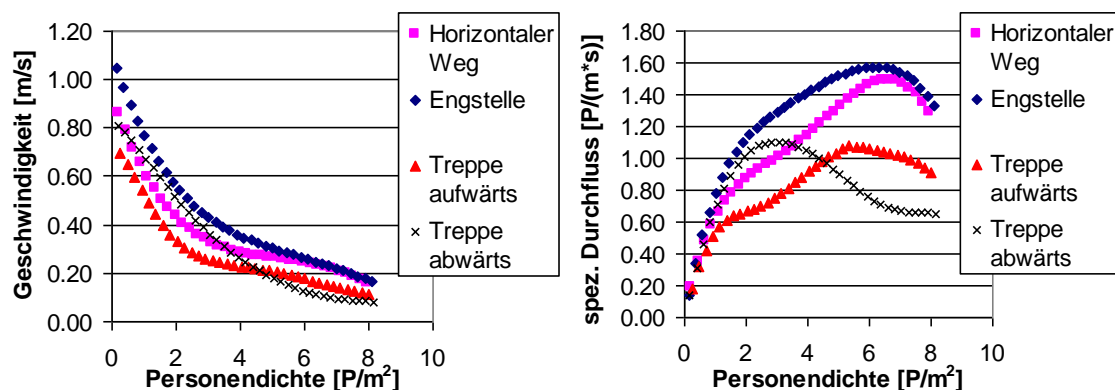


Bild A2.37 Zusammenhang zwischen Personendichte und (a) Laufgeschwindigkeit bzw. (b) spezifischem Fluss auf verschiedenen Wegelementen für „Normalbedingungen“ aus Werten nach [A2.22]

Da der Hörsaal achsensymmetrisch ist, wird die Räumung von 500 Personen über einen seitlichen (200 P) und mittleren (300 P) Stufengang betrachtet [A2.29]. In Tabelle A2.17 und Tabelle A2.18 sind die Parameter für Personendichten (Sp. 8), Personenflüsse (Sp. 10, 13, 15) und Geschwindigkeiten (Sp. 17) in der Schreibweise nach P&M [A2.22] sowie bezogen auf die Projektionsfläche von $0,113 \text{ P/m}^2$ für den 1. und 2. Rettungsweg (RW) angegeben.

Für den 1. Rettungsweg gilt für die anzusetzenden Anfangsbedingungen, dass die aus den Sitzreihen ausströmenden Personen auf den Stufengängen (Element 1-1 bzw. 1-2) zu einer maximalen Personendichte von $8,14 \text{ P/m}^2$ (Spalte 7) führen. Aus dem Bild A2.43a+b ergeben sich dann für die Stufengänge als Wegelement „Treppe aufwärts“ eine Geschwindigkeit von $0,11 \text{ m/s}$ (Sp. 16) und ein spezifischer Fluss von $0,89 \text{ P/(m*s)}$ (Sp. 12). Für die weiteren Wegelemente wird zunächst der erforderliche Fluss bestimmt, der sich aus dem bestehenden Fluss mal dem Verhältnis der Wegbreiten ergibt. Falls der erforderliche Fluss durch das Wegelement abgedeckt werden kann (vgl. Bild A2.43b), ergibt sich daraus die neue Personendichte und Geschwindigkeit. Für die Wegelemente bis zur Treppe im Foyer ergeben sich keine weiteren Staus. Die Eingangstür (Nr. 1-8) wird von beiden Teilströmen mit $2 \times 1,61 \text{ P/s}$ (Sp. 14) durchströmt. Hierdurch wird auf der Treppe (Nr. 1-9) ein spezifischer Fluss (Sp. 9) von $3,22 \text{ P/s} / 2,4 \text{ m} = 1,12 \text{ P/(m*s)}$ erfordert, der durch die „Treppe abwärts“ gerade nicht mehr ermöglicht wird (vgl. Bild A2.43b). Im Modell wird dann ein Stau mit maximaler Personendichte und geringem spezifischen Fluss von nur $0,65 \text{ P/(m*s)}$ über die Treppe angenommen (vgl. Bild A2.43b). 500 Personen benötigen zum Passieren der Treppe $500 \text{ P} / (0,65 \text{ P/(m*s)} * 2,4 \text{ m}) \approx 318 \text{ s}$ (Sp. 18). Zusammen mit der Laufzeit für den Kopf des Personenstroms (Sp. 19) ergibt sich eine Bewegungszeit bis zum Betreten der Foyertreppe von $318 \text{ s} + 39 \text{ s} = 347 \text{ s}$. Es kann weiter berücksichtigt werden, dass sich auf dem Quergang zwischen Ausgangstür (1-8) und Treppe (1-9) auf ca. 10 m^2 die letzten ca. 81 Personen aufhalten, ohne dass es zu einem Stau zurück in den Hörsaal kommt. Damit ergibt sich für die Zeit bis zum Verlassen des Hörsaals $t_{\text{Bewegung-1}} = 347 \text{ s} - 81 \text{ P} / (0,65 \text{ P/(m*s)} * 2,4 \text{ m}) \approx 295 \text{ s}$.

Für den 2. Rettungsweg gilt Tabelle A2.18. Auf den Stufenreihen (Nr. 2-1 u. 2-2) kommt es wieder zur maximalen Personendichte und dadurch zu einem limitierenden Personenfluss. Weitere Stauungen im Rettungswegverlauf treten nicht auf. Die Bewegungszeit beträgt $t_{\text{Bewegung-2}} = 63 \text{ s} + 255 \text{ s} = 318 \text{ s}$.

Mikroskopische Modellierung mit ASERI

Grundlage des Räumungsmodells ASERI [A2.26] ist eine Beschreibung der individuellen Bewegung der simulierten Personen (Agenten), wobei für das Fluchtverhalten wesentliche Aspekte wie Reaktions- und Verzögerungszeiten, Wahl des Fluchtweges, Verhalten bei Staubbildung, individuelle Mobilität und Raumbedarf explizit in der Simulation berücksichtigt werden. Die Gebäudegeometrie wird dreidimensional in den für den Ablauf der Räumung relevanten Details abgebildet (Bild A2.38). Bei der Wahl des individuellen Fluchtweges sind neben den üblichen Standards (lokal oder global kürzester Weg, gleichmäßige Auslastung der Ausgänge) u.a. auch individuelle Präferenzen oder eine individuelle Reaktion auf Staubbildung möglich. Die Personenbewegung basiert auf der Simulation elementarer Bewegungsabläufe innerhalb einer Menschenansammlung (Aufschließen, Ausweichen, Überholen, Mindestabstand). Bezüglich des Raumbedarfs ist ein Agent vom Typ "Fußgänger" in ASERI durch Schulter- und Brustbreite sowie durch die unbehinderte ebenerdige Gehgeschwindigkeit charakterisiert. Auf

Treppen reduziert sich die Gehgeschwindigkeit entsprechend eines empirischen Reduktionsfaktors, abhängig von der Stufengeometrie. Es wurden für die Berechnungen die für rechnerische Nachweise empfohlene Grundeinstellung (Bewegungsmodus Räumung, inhomogene Population) eingesetzt.

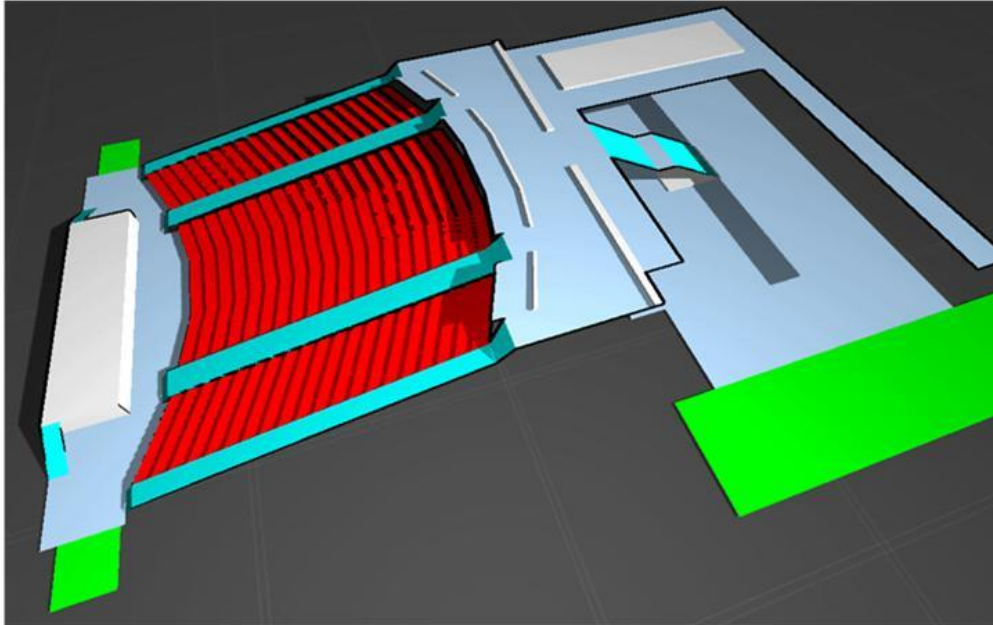


Bild A2.38 ASERI – 3D-Ansicht des Simulationsmodells mit Treppe im Foyer

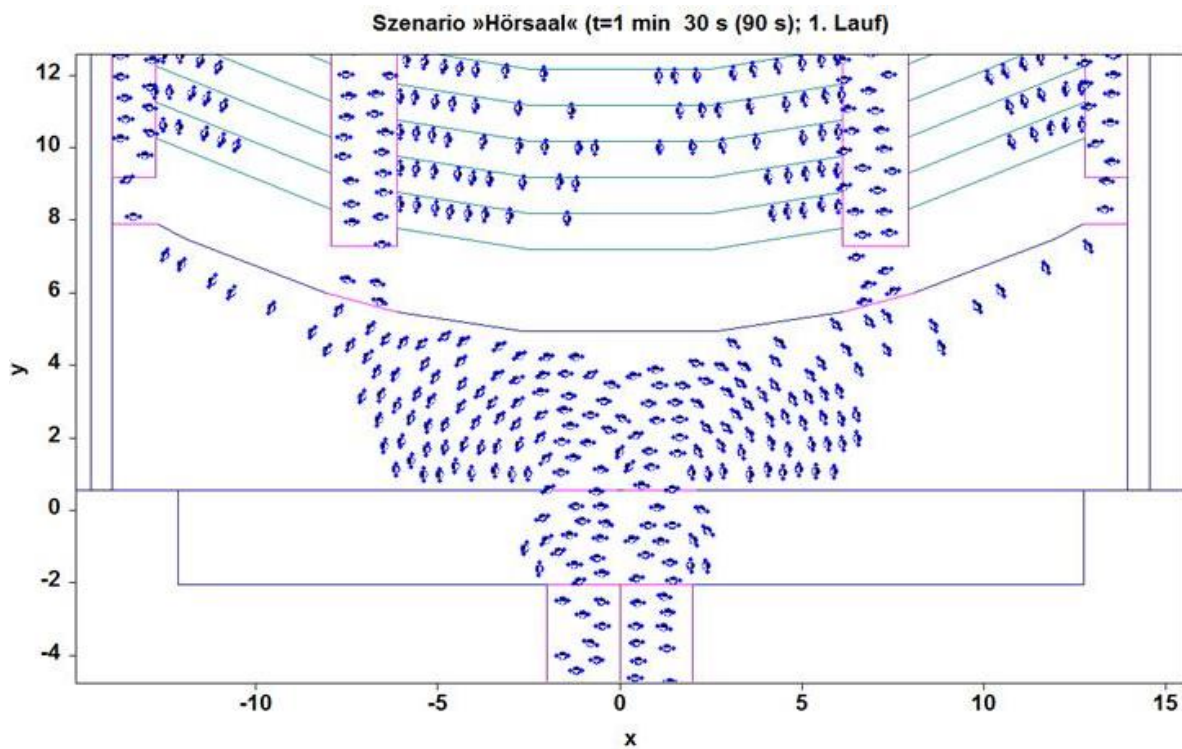


Bild A2.39 Staubbildung im Bereich vor den Hauptausgängen (1. Rettungsweg) für eine ASERI-Simulation

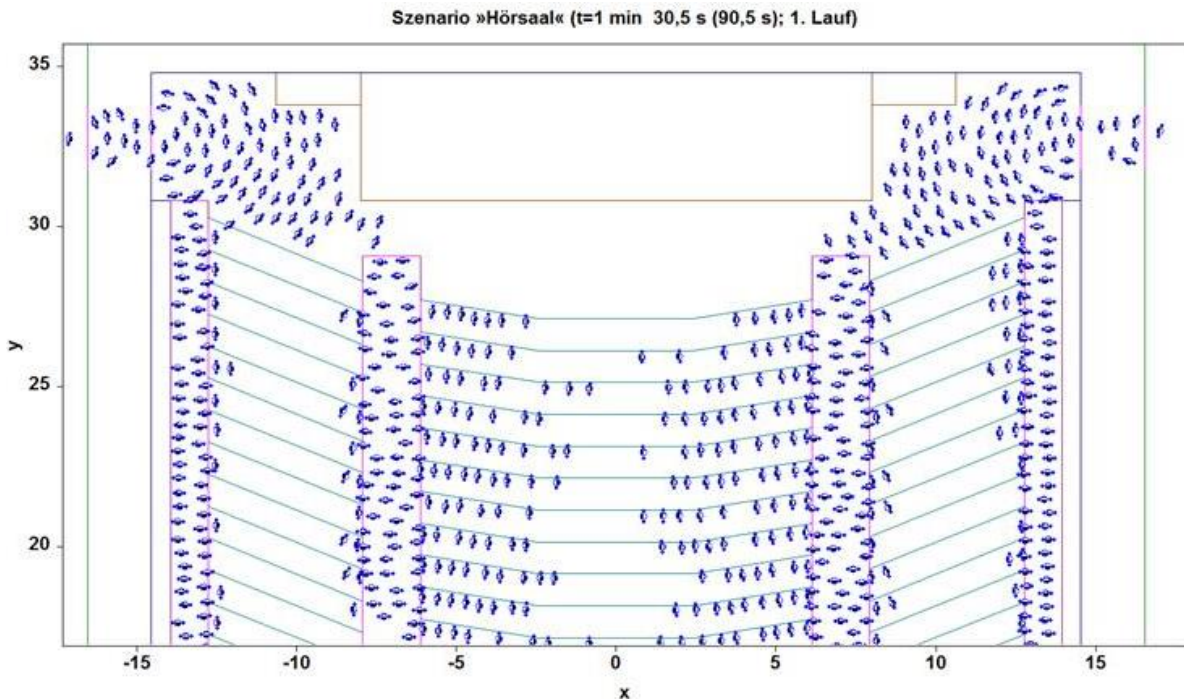


Bild A2.40 Staubildung vor den Notausgängen neben dem Podium (2. Rettungsweg) für eine ASERI-Simulation

Der Grundriss in Bild A2.39 zeigt einen Ausschnitt des Szenariums mit dem oberen Teil des Auditoriums, dem Foyer und dem oberen Abschnitt der zum Haupteingang führenden Treppe. Man erkennt, dass sich bei der Simulation für eine Räumung über den 1. Rettungsweg nicht nur vor der Treppe im Foyergebäude, sondern vor allem auch im Bereich vor den Hauptausgängen ein Stau bildet, der zeitweise auch den Personenstrom aus den beiden zentralen Ausgängen des Auditoriums behindert.

Für den 2. Rettungsweg ergeben sich Staubildungen direkt vor den beiden Notausgängen (Bild A2.40). Diese behindern den Zustrom aus den seitlichen Stufengängen, sodass die Personen in den seitlichen Sitzreihen zum Teil zu den Mittelstufengängen ausweichen.

Tabelle A2.19 ASERI - Fluchtzeiten für den 1. und 2. Rettungsweg

Fluchtzeit	1. RW	2. RW
Minimum	321 s	306 s
Maximum	328 s	319 s
95 %	327 s	318 s
Mittelwert	324 s	311 s

Tabelle A2.19 zeigt die statistische Auswertung von jeweils 10 Rechenläufen für die beiden untersuchten Szenarien 1. und 2. Rettungsweg. Die mittlere Fluchtzeit aus 10 Rechenläufen beträgt für den 1. Rettungsweg 324 s und für den 2. Rettungsweg 311 s.

Mikroskopische Modellierung mit buildingEXODUS

Das diskrete Individualmodell buildingEXODUS [A2.23] wurde von der Universität Greenwich entwickelt. Die Geometrie wird durch Zellen dargestellt, die durch Bögen von standardmäßig 0,5 m Länge orthogonal bzw. entsprechend 0,707 m Länge diagonal verbunden werden. Das Hörsaalgebäude mit der anschließenden Treppe wird durch horizontale Zellen, Stufenzellen, Sitzplatzzellen und interne bzw. externe Ausgangszellen diskretisiert (Bild A2.41). Die Personen der voreingestellten „Standardpopulation“ befinden sich auf den Sitzen und den Stufenreihen. Die Breite der Wegelemente wurde der Empfehlung in der Programmdokumentation folgend jeweils abgerundet, sodass z. B. die 1,40 m breiten seitlichen Engstellen an der Wandscheibe (Nr. 5) nur als 1,00 m breite Durchgänge dargestellt werden. Bzgl. der Bewegung auf Stufen besteht die alternative Option, eine Spurbreite der Personen von 0,76 m zu wählen, die der schwankenden Bewegung der Personen auf Treppen Rechnung tragen soll. Da die Steigung auf den Stufenreihen gering ist und zwei Personen nebeneinander auf einer Stufe Platz haben, wurde diese Option nicht aktiviert und ein Stufengang in der Breite von zwei Zellen (1 m) verwendet. Der Vorschlagswert des maximalen spezifischen Durchflusses an den Ausgängen von 1,33 P/(m*s) wurde übernommen. Im Gegensatz zu den anderen Modellen wurde hier eine Reaktionszeit der Personen von 0 bis 30 s verwendet.

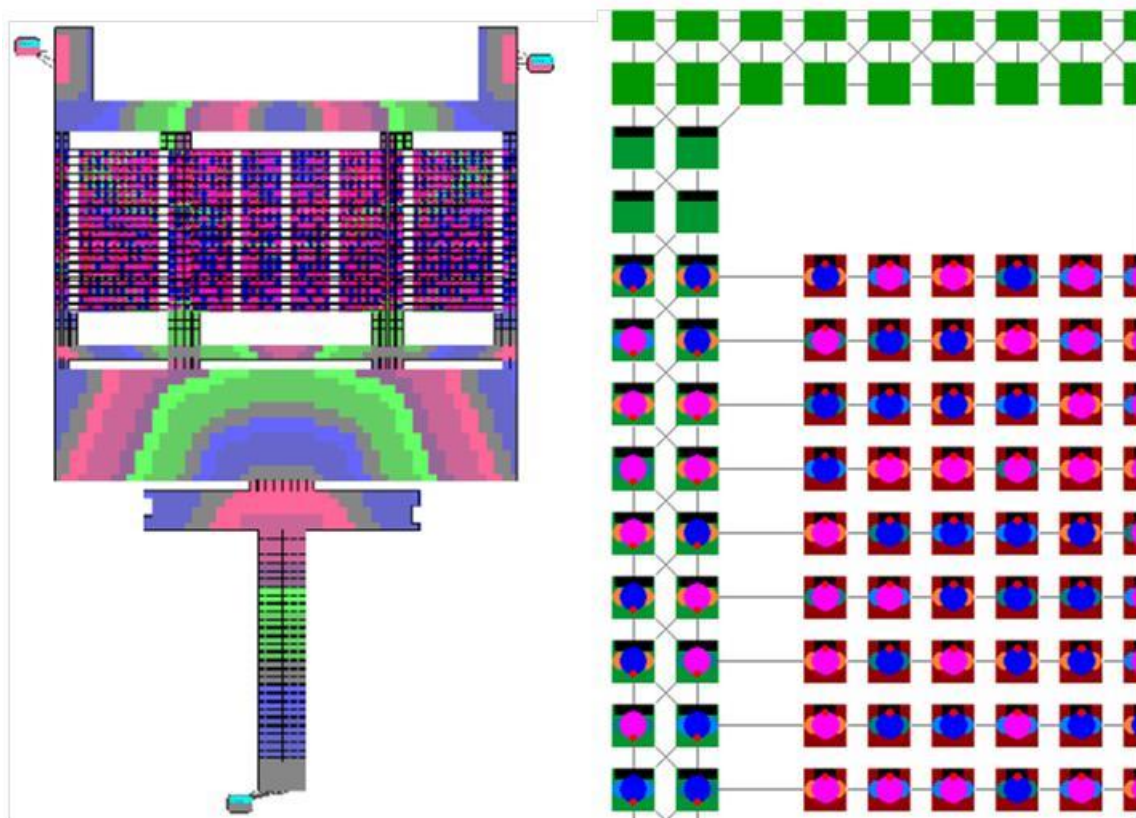


Bild A2.41 Mit buildingEXODUS diskretisierter Hörsaal mit Treppe ins Foyers (rechts). Links ein Detailausschnitt der Sitzplätze und des linken Stufenganges.

Bei der Flucht über den 1. Rettungsweg wird der Personenfluss auf den Stufengängen limitiert. Vor der Treppe (Nr. 1-9) im Foyergebäude bilden sich temporär kleine Staus, die nicht in den Hörsaal zurückwirken. Die mittlere Fluchtdauer aus vier Rechengängen beträgt 382 s.

Beim 2. Rettungsweg wird der Personenfluss wieder auf den Stufengängen limitiert. Dazu werden kleine, stationäre Staus vor den Notausgängen (Nr. 2-6) angezeigt. Die mittlere Fluchtdauer aus vier Rechengängen beträgt 265 s.

Mikroskopische Modellierung mit FDS+Evac

Evac [A2.25] ist ein Zusatzmodul für das CFD-Modell FDS. Basis der Betrachtung bildet ein Gitternetz mit einer Gitterweite von 0,2 m. Wie im Modell buildingEXODUS werden die Sitzränge vereinfacht geradlinig ausgeführt. Die Personen entsprechen der FDS+Evac Standardpopulation „adult“ mit einer freien Gehgeschwindigkeit von $1,25 \pm 0,30$ m/s. Die Geschwindigkeit auf Treppen für die Auf- und Abwärtsbewegung wird mit 50 % der freien Gehgeschwindigkeit angesetzt. Über Potentialdifferenzen gelangen die Akteure zu den verfügbaren Ausgängen. Zu Beginn der Simulation befinden sich die Personen in den Sitzreihen und Stufengängen. Für beide Szenarien wurden je 10 Rechenläufe durchgeführt und das arithmetische Mittel der Fluchtdauer gebildet.

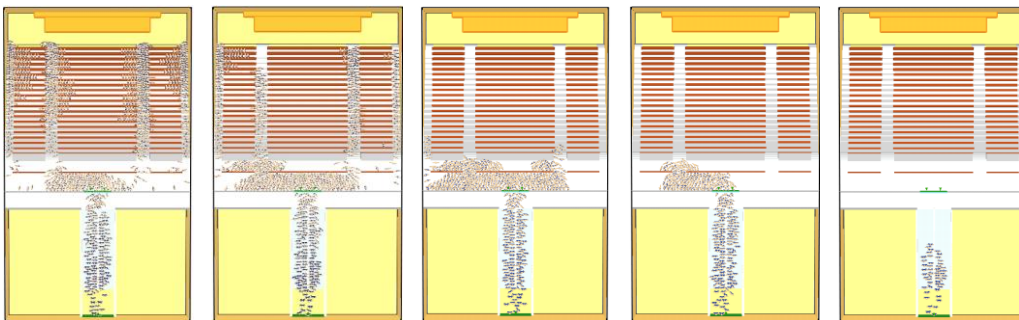


Bild A2.42 FDS+Evac - Positionen der Personen nach 80, 160, 240, 320 und 400 Sekunden für den 1. Rettungsweg (S. Scheltern)

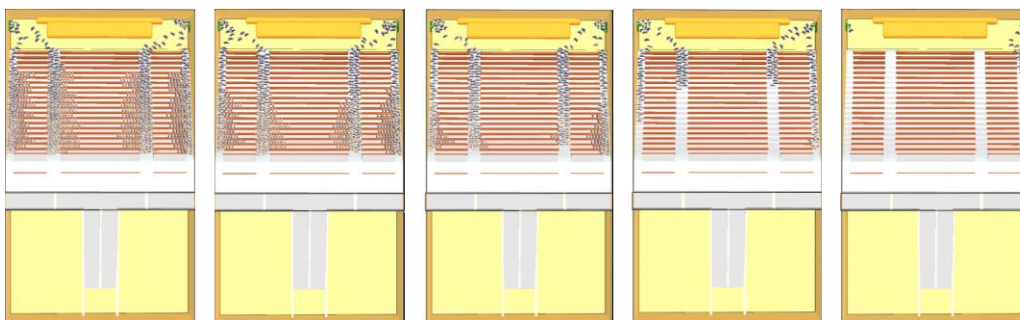


Bild A2.43 FDS+Evac - Positionen der Personen nach 45, 90, 135, 180 und 225 Sekunden für den 2. Rettungsweg (S. Scheltern)

Obwohl die Raumgeometrie und die Verteilung der Personen spiegelsymmetrisch sind, ist bei der Nutzung des ersten Rettungsweges eine unsymmetrische Verteilung der Stauungen zu erkennen (vgl. Bild A2.42). Bei mehreren vorhandenen Türen (hier: zwei direkt nebeneinander liegende Ausgangstüren) verwendet FDS+Evac einen speziellen Ansatz um für den einzelnen Akteur abzuschätzen, welcher Weg der effektivste und somit der schnellste sein könnte. Dieses Verfahren wird in regelmäßigen Abständen erneut durchgeführt, wodurch es auch zu einer Änderung des bevorzugten Ausgangs kommen kann, falls ein anderer Ausgang als deutlich

besser geeignet erscheint. Diese Umorientierung ist jedoch nicht grundsätzlich stauabhängig, sondern kann bereits deutlich vor Entstehung eines solchen, z. B. aufgrund von Wechselwirkungen mit anderen Personen, stattfinden. Für den 1. Rettungsweg kann nun beobachtet werden, dass im Bereich der Ausgänge eine solche Änderung des bevorzugten Ausgangs kaum stattfindet, weshalb eine Tür durch die Personen an der anderen Tür zum Teil blockiert wird. Hierdurch kommt es zu einer einseitigen Verstärkung der Stauung im Türbereich. Dieser unrealistische Effekt wurde in einer späteren Version von FDS+Evac behoben. Die Fluchtdauer bis zum Passieren der Hörsaal-Türen beläuft sich im Mittel auf 373 s (Schwankungsbreite < 2 %) bei einem maximalen spezifischen Fluss an den Türen von 0,85 P/ms.

Analog treten für die Nutzung des 2. RW deutliche Stauungen beim Betreten der Stufengänge auf (Bild A2.43). Im Bereich der Notausgänge sind hingegen nur geringe Stauungen zu verzeichnen, sodass die Fluchtdauer im Mittel bei 239 s liegt (Schwankungsbreite < 3 %). Der maximale spezifische Fluss an den Türen beträgt 1,5 P/ms.

Mikroskopische Modellierung mit PedGo

Die Grundlage der Simulation mit PedGo [A2.24] ist ein Multi-Agenten-Modell auf einem quadratischen Zellgitter mit Kantenlänge einer Zelle von 0,4 m, sodass sich eine Zellfläche von 0,16 m² ergibt (Bild A2.44). Die Fläche der Zelle entspricht der Standfläche einer Person in dichtem Gedränge. Im Unterschied zu buildingEXODUS werden Kanten nicht explizit repräsentiert. Jede Zelle ist mit allen zugänglichen acht Nachbarzellen verbunden. Es gibt zugängliche und nicht zugängliche (Wand, Möbel, etc.) Zellen. Personen werden als Individuen (Agenten) mit eigenständigen Verhaltensweisen, Fähigkeiten und Zielen in diskretem Raum und diskreter Zeit repräsentiert. Die Personen stehen jeweils auf einer Zelle und bewegen sich im Verlauf der Evakuierung von Zelle zu Zelle in Richtung Ausgang. Türen verringern den Personenstrom. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, reduzieren die simulierten Personen auf Türzellen ihre Laufgeschwindigkeit auf ein Viertel. Zur Berücksichtigung von Treppen werden Treppenzellen eingeführt. Hier bewegen sich die Personen mit halber Geschwindigkeit. Auf ihrem Weg zu den Ausgangszellen folgen die Personen den vom Benutzer vorgegebenen Routen. Jede Person verfügt über einen individuellen Parametersatz, der vor jedem Programmdurchlauf neu vergeben wird und der u. a. auch die Laufgeschwindigkeit (anzugeben in Zellen/Sekunde) und die Reaktionszeit enthält. Für die Modellierung des Hörsaals wurden die in Tabelle A2.20 gezeigten Parameter verwendet. Die genaue Bedeutung der Parameter ist in [A2.24] erläutert.

Für den 1. Rettungsweg ergibt sich eine Fluchtzeit (Mittelwert aus 500 Rechenläufen) von 348 Sekunden (Standardabweichung 7 s) für das Verlassen des Hörsaales, für den 2. Rettungsweg entsprechend 276 s (Standardabweichung 5 s). Es treten signifikante Stauungen (hier definiert als Bereiche, in denen eine Dichte von 4 Personen/m² oder mehr während mindestens 10 % der mittleren Gesamtfluchtzeit auftritt) auf den Stufengängen (1. Rettungsweg) bzw. vor den Notausgängen 2-6 (2. Rettungsweg) auf (Bilder A2.45 und A2.46). Tabelle A2.21 zeigt die statistische Auswertung der jeweils 500 Rechenläufe, wobei seed die Initialisierung des Zufallszahlengenerators angibt.

Tabelle A2.20 PedGo – Eingabeparameter

	Min	Max	Mittel	Stdabw.	Verteilung
v_{max} (in Zellen/Sekunde)	2	5	3	1	normal
Patience (Geduld)	nicht verwendet				
Sway (Schwanken)	1	5	3	2	normal
Reaction (Reaktion)	0	0	-	-	equal
Dawdle (Trödeln)	0	30	15	5	normal
Inertia (Trägheit)	1	5	3	2	normal
Gruppenzusammenhalt	Kein				

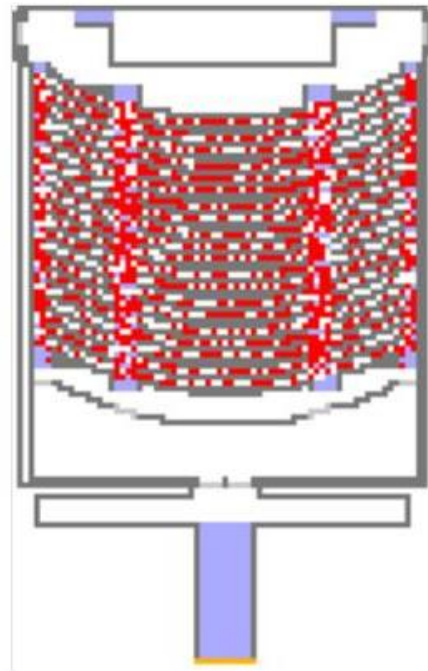
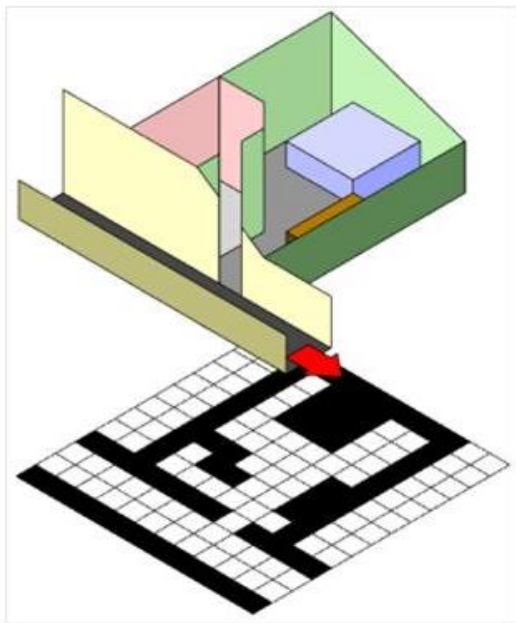


Bild A2.44 PedGo – Diskretisierung und Ausgangssituation (H. Klüpfel)

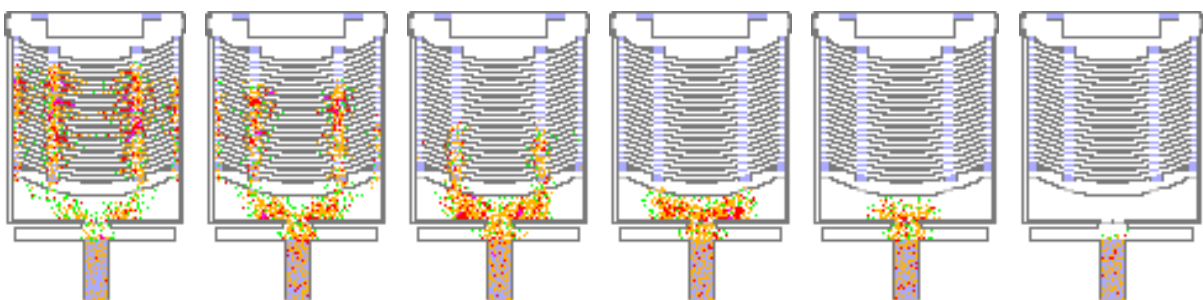


Bild A2.45 PedGo, 1. Rettungsweg – Positionen der Personen nach 1, 2, 3, 4, 5 und 6 min (H. Klüpfel)

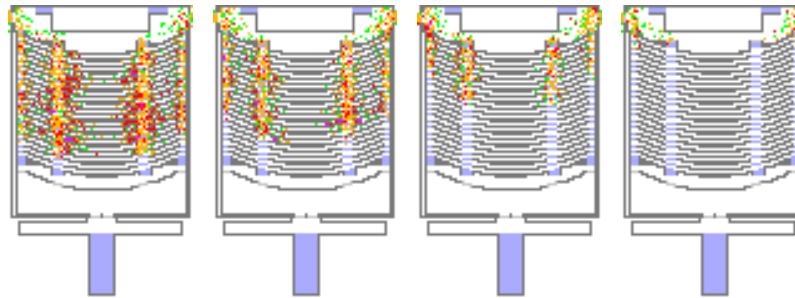


Bild A2.46 PedGo, 2. Rettungsweg – Positionen der Personen nach 1, 2, 3 und 4 min (H. Klüpfel)

Tabelle A2.21 PedGo – Zusammenfassung der Ergebnisse

	1. RW			2. RW		
	s	h:min:s	seed	s	h:min:s	seed
Mittelwert	348	00:05:48	4750	276	00:04:36	4713
Standardabw.	7	00:00:07	---	5	00:00:05	---
95%-Fraktile <	352	00:05:52	4741	285	00:04:45	4712

A2.6.4.4 Ergebnisvergleich

Tabelle A2.22 zeigt die Mittelwerte der berechneten Fluchtzeiten für die beiden Hörsaal-Szenarien 1. und 2. Rettungsweg im Vergleich. Der Mittelwert aus allen Modellrechnungen für die Räumung des Hörsaals (Fluchtzeit) beträgt 338 s (1. Rettungsweg) bzw. 285 s (2. Rettungsweg). D. h. es gibt Abweichungen zwischen den Modellen von -16 % bis +13 %. Diese bewegen sich damit innerhalb eines Rahmens, der für ingenieurtechnische Rechenverfahren im Brandschutz typisch ist. Es zeigt sich weiterhin, dass ein einfaches Modell wie die Kapazitätsanalyse nicht immer die konservativsten Ergebnisse liefert.

Wie in Kapitel 9 ausgeführt genügt es nicht, sich für die Bewertung alleine auf die berechneten Flucht- bzw. Räumungszeiten zu stützen. Vielmehr muss auch die Qualität der Räumung - und damit insbesondere die Stausituation - gewürdigt werden. Die Lage der wesentlichen Staus in den einzelnen Berechnungen und Simulationen ist hier nicht immer einheitlich. Ein Grund dafür ist, dass sich die Lage der Staus durch kleine Änderungen in den Wegbreiten verändern kann, wie sie z. B. schon durch Rundungen bei diskreten Modellen auftreten können. Weitere modellspezifische Effekte wurden bei Beschreibung der einzelnen Modellrechnungen diskutiert.

Es zeigt sich zusammenfassend, dass kritische Stellen im Zweifelsfall detailliert betrachtet werden müssen, wobei eine Sensitivitätsanalyse und unter Umständen die Betrachtung mit verschiedenen Modellen hilfreich sein kann.

Tabelle A2.22 Berechnete Fluchtzeiten und Staucharakteristiken

Modell	1. RW t _{Flucht}	1. RW Stauungen	2. RW t _{Flucht}	2. RW Stauungen
Kapazitätsanalyse	304 s	Eingangstür (Nr. 1-8)	298 s	Notausgang (Nr. 2-6)
Predtetschenski & Milinski	295 s	Stufengänge Foyertreppe	318 s	Stufengänge
buildingEXODUS	382 s	Stufengänge	266 s	Stufengänge
PedGo	348 s	Stufengänge Hauptausgänge Foyertreppe	276 s	Stufengänge Notausgang
FDS+Evac	373 s	Stufengänge Hauptausgänge	239 s	Stufengänge
ASERI	324 s	Stufengänge Hauptausgänge	311 s	Stufengänge Notausgang

Die Simulationsrechnungen wurden im Rahmen der Studie [A2.27] durchgeführt und dokumentiert.

A2.6.5 Schlussbetrachtung

Im Mittel über alle Modellrechnungen für die Räumung des Hörsaals beträgt die Fluchtzeit 338 s (1. Rettungsweg) bzw. 285 s (2. Rettungsweg). Zusammen mit der Pre-Movementzeit von 120 s ergibt dies eine Räumungszeit von 458 s für den ersten Rettungsweg.

Für das Gefahrenszenario im Hörsaal zeigt der Vergleich der Zeiten bis zur Nichteinhaltung der Leistungskriterien „optische Dichte“ (380 s) und „Höhe der raucharmen Schicht“ (205 s) aus der Tabelle A2.13 mit der bestimmten Räumungsdauer, dass bei konservativer Herangehensweise eine gefahrlose Räumung nicht nachgewiesen werden kann, obwohl der Hörsaal im Wesentlichen genehmigungsfähig nach materiellem Baurecht ist.

Wenn unterstellt wird, dass der Räumungsverlauf durch Erreichen der vorgenannten Kriterien nicht wesentlich beeinflusst wird, zeigt die zusätzliche Betrachtung der FED (FED > 0,3 nach 717 s) allerdings auch, dass selbst unter besonders konservativen Bedingungen (höhere Brandentwicklungsgeschwindigkeit und Ausfall der RWA) kein katastrophaler Ausgang prognostiziert wird.

Für ein konservatives Brandszenario in Verbindung mit einem auslegungsgemäßen Räumungsszenario sollte ein Sicherheitsfaktor von > 1,5 zusammen mit den Kriterien „Höhe der raucharmen Schicht“ bzw. „Erkennungsweite“ angestrebt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Brandszenario, z. B. ein Garderobenbrand, Teile des Rettungsweges außer Funktion setzen kann.

Zusätzlich sollten weiter zugespitzte Szenarien untersucht werden, bei denen zusätzlich eine Überfüllung der Versammlungsstätte und/oder der Ausfall von Fluchtwegen etc. unterstellt wird. Für diese Szenarien kann die weniger konservative FED zusammen mit einem Sicherheitsfaktor als Beurteilungskriterium herangezogen werden. Da die Fluchtzeiten in einer einfachen Beziehung zur Personenanzahl und zur Breite der Engpässe stehen, kann alternativ z. B. eine maximale Personenzahl für den Grenzzustand der Schutzzielerfüllung bestimmt werden. Dadurch lassen sich Auslegungsreserven des Gebäudes aufzeigen.

Die Entwicklung abgestufter Szenarien lehnt sich an die Vorgehensweise bei Sicherheitsbetrachtungen im Bereich Anlagensicherheit an, bei der zwischen „zu verhindernden Störfällen“ und „Dennoch Störfällen“ unterschieden wird.

Weitergehende Überlegungen zum Sicherheitsniveau und zu Bemessungsbränden in nach MVStättV [A2.2] genehmigungsfähigen Versammlungsstätten werden in [A2.29], [A2.30] angestellt.

A2.7 Literatur zu Anhang 2

- [A2.1] Musterbauordnung – MBO, Fassung November 2002, zuletzt geändert im Februar 2019.
- [A2.2] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättV), ARGEBAU Fachkommission Bauaufsicht, Fassung Juli 2014, www.is-argebau.de.
- [A2.3] Begründung und Erläuterung zur Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättV), ARGEBAU Fachkommission Bauaufsicht, Fassung Juli 2014.
- [A2.4] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1.2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [A2.5] *BUB, H.; KERSKEN-BRADLEY, M.; HOSSER, D.; NOWAK, H.; SCHNEIDER, U.; SCHUBERT, K.-H.*: Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen im konstruktiven baulichen Brandschutz. NABau im DIN, März 1979.
- [A2.6] *BUB, H.; HOSSER, D.; KERSKEN-BRADLEY, M.; SCHNEIDER, U.*: Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz. Berlin: Verlag E. Schmidt, 1983.
- [A2.7] DIN EN 1990:2002-10, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- [A2.8] *HOSSER, D.; WEILERT, A.; KLINZMANN, C.; SCHNETGÖKE, R.; ALBRECHT, C.*: Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, November 2008, IRB Bauforschung, Band T 3221.
- [A2.9] *MCGRATTAN, K. B.; FORNEY, G.*: Fire Dynamics Simulator (Version 4), Users Guide, NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 2004.

- [A2.10] *MCGRATTAN, K. B.; FORNEY, G.*: Fire Dynamics Simulator (Version 6), Users Guide, SVN Respository Revision : 14173, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 2012.
- [A2.11] *MCGRATTAN, K. B.; HOSTIKKA, S.*: Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide, Volume 3: Validation, SVNRespository Revision: 7033, NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 2010.
- [A2.12] *RIESE, O.*: Ermittlung der Brandwirkungen mit Brandmodellen. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage '05, 11. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 28. und 29. September 2005. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft Nr. 185, 2005.
- [A2.13] DIN EN 1991-1-1:2010-12, Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- [A2.14] DIN EN 1991-1-2:2010-12, Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [A2.15] DIN EN 1993-1-2:2010-12, Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahl
- [A2.16] Prüfbericht Nr.: F.3-012/88 des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München.
- [A2.17] DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [A2.18] Schneider Bautabellen für Ingenieure, 20. Auflage, Werner Verlag, 2012.
- [A2.19] ANSYS Rev. 8.0: Swanson Analysis Systems, Inc. Houston (USA).
- [A2.20] *PURSER, D.*: Toxicity assessment of combustion products and human behaviour in fires. In: Tagungsband 10. IBS „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“, 6. und 7. Juni 2005 in Hannover. vfd / iBMB, 2005.
- [A2.21] *PURSER, D. A.; McALLISTER, J.L.*: Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer New York, 5th Ed. 2016
- [A2.22] *PREDTETSCHENSKI, V. M.; MILINSKI, A. I.*: Personenströme in Gebäuden – Berechnungsverfahren für die Projektierung. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld. 1971.
- [A2.23] *GALEA, E.R. ET AL.*: buildingExodus 4.00, Users Guide and Technical Manual. University of Greenwich. Greenwich. 2004
- [A2.24] PedGo Handbuch: TraffGo HT GmbH, Version 2.5. Duisburg, 2011
- [A2.25] *KORHONEN, T.; HOSTIKKA, S.*: Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac, Technical Reference and User`s Guide (FDS 5.5.3, Evac 2.2.3), VTT Technical Research Centre of Finland, 2010
- [A2.26] Referenzhandbuch ASERI: Ausgabe März 2011 für Version 4.8

- [A2.27] *FORELL, B.; KLÜPFEL, H.; SCHNEIDER, V.; SCHELTER, S.*: Vergleichende Anwendung verschiedener Räumungsmodelle. Tagungsband zur 59. vfdb Jahresfachtagung 2011, 30. Mai bis 1. Juni, Berlin, S. 465-493
- Zweitveröffentlichung: Vergleichende Betrachtung zu Evakuierungsberechnungen, "Fire Engineering 2011" Ingenieurakademie West e.V., Düsseldorf, 6. Juli 2011, <http://www.rimea.de/de/fachbeitraege/vergleichende-betrachtung-zu-evakuierungsberechnungen/>
- [A2.28] *FORELL, B.*: Lernen aus exemplarischen Schadensfällen in Diskotheken und ähnlichen Vergnügungsstätten. In: VdS (Hrsg.): Brandschutz- und Sicherheitskonzepte für große Versammlungsstätten und Bauwerke für viele Personen, Köln, 2004.
- [A2.29] *MEHL, F.*: Richtlinien für die Erstellung und Prüfung von Brandschutzkonzepten. In: Hosser, D. (Hrsg.): Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbauten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Heft 178, 2004.
- [A2.30] *FORELL, B.*: Niveau der Personensicherheit von Versammlungsstätten - Nachweis nach vfdb-Leitfaden. vfdb-Jahresfachtagung, Leipzig, 2007.