

Leitfaden**Ingenieurmethoden des Brandschutzes**

herausgegeben von Dietmar Hosser

2. Auflage Mai 2009

Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes

Technischer Bericht vfdb TB 04-01

2. Auflage Mai 2009

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

Altenberge ; Braunschweig : vfdb, 2009

386 Seiten, A4

elektronische Version: 2.0.7 (13.10.2009)

Haftungsausschluss: Dieses Dokument wurde sorgfältigst 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. 2009

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	13
1.1 Konzept und Aufbau	13
1.2 Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Anwendung	13
1.3 Qualitative Analyse	15
1.4 Quantitative Analyse	15
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	20
2.4 Brandschutztechnische Infrastruktur	20
2.5 Umgebungseinflüsse	21
2.6 Nutzer	22
3 Schutzziele und Leistungskriterien	23
3.1 Allgemeines	23
3.2 Zusammenhang zwischen Brandrisiken, Brandszenarien und Schutzz Zielen	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	30
3.5 Erfüllung funktionaler Anforderungen durch Einhaltung von Leistungskriterien	31
3.5.1 Definition der Schutzziele durch Technische Regeln	31
3.5.2 Konkrete Anforderungen in den Bauvorschriften	32
3.5.3 Verknüpfung von Schutzz Zielen, Nachweisen und Leistungskriterien	33
3.6 Hinweise zum Sicherheitsniveau bei Nachweisen mit Hilfe des Leitfadens	36
3.7 Literatur	37
4 Brandszenarien und Bemessungsbrände	39
4.1 Einleitung	39
4.1.1 Grenzen der Modellierbarkeit von Brandereignissen und Sicherheitsaspekte von Bemessungswerten	41
4.2 Begriffe	41
4.2.1 Begriffserläuterungen	41
4.2.2 Allgemeine Hinweise zur Auswahl von Kenngrößen	41
4.3 Bemessungsbrand-Szenarien	44
4.3.1 Allgemeines	44

Inhaltsverzeichnis

4.3.2	Grundsätze zur Identifizierung der maßgeblichen Bemessungsbrand-Szenarien	44
4.3.3	Identifizierung der maßgeblichen Bemessungsbrand-Szenarien	45
4.3.4	Systematische Auswahl von Bemessungsbrand-Szenarien	45
4.3.5	Bemessungsbrandszenarien für die Nutzung der Rettungswege durch die Gebäudebenutzer	47
4.3.6	Bemessungsbrandszenarien für die Fremdrettung durch die Feuerwehr	47
4.3.6.1	Szenarien und Bewertungskriterien für „planbare Fremdrettungen“	49
4.3.6.2	Fremdrettung über die Leitern der Feuerwehr	50
4.3.6.3	Fremdrettung aus „Schutzräumen“ innerhalb von Gebäuden	50
4.3.7	Bemessungsbrandszenarien für die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr	50
4.3.8	Bemessungsbrand-Szenarien für die Bauteil- bzw. Tragwerksbemessung	51
4.3.9	Bemessungsbrandszenarien für Sachwertschutzaufgaben	52
4.4	Bemessungsbrände	55
4.4.1	Der Brandverlauf und Grundsätze seiner Modellierung	55
4.4.2	Normative Bemessungsbrände	60
4.4.3	Brandentstehung: Zündenergie und Zündinitial	60
4.4.3.1	Zündquelle und Zündinitial	61
4.4.3.2	Objektspezifische Bemessungsbrände für kleine Brandobjekte	61
4.4.3.3	Bemessungsbrände aufgrund von objektspezifischen Brandversuchen	62
4.4.3.4	Zündquellen und Zündinitiale	62
4.4.3.5	Stoffkennwerte der Brandgüter	62
4.4.4	„Schwelbrände“ sowie Vorbrennzeit bis zur stetigen Brandausbreitung	63
4.4.5	Brände einzelner Gegenstände	63
4.4.6	Design-Fire-Ansätze für die Brandausbreitungsphase	63
4.4.6.1	Berechnungen mit dem t^2 -Modell für die Brandausbreitungsphase	64
4.4.6.2	Berechnungen mit dem geometrischen Brandausbreitungsmodell	66
4.4.6.3	Normativ festgelegte Bemessungsbrände für die Brandausbreitungsphase	69
4.4.7	Flashover	69
4.4.7.1	Flashover-Temperatur	70
4.4.7.2	Wärmestrahlung aus der Heißgasschicht	71
4.4.7.3	Flashover-Zeit	72
4.4.7.4	Flashover-Energie	72
4.4.8	Vollbrandphase	72
4.4.8.1	Brandlastgesteuerter Brand	72
4.4.8.2	Ventilationsgesteuerter Brand	73
4.4.8.3	Normative Bemessungsbrände für die Vollbrandphase	73
4.4.8.4	Vereinfachte Naturbrandmodelle für die Vollbrandphase	73
4.4.9	Abklingphase	77
4.4.10	Berücksichtigung von Löschmaßnahmen	79
4.4.10.1	Löschenmaßnahmen generell	79
4.4.10.2	Löschenmaßnahmen der Feuerwehr	79
4.4.10.3	Automatischen Löschanlagen	79
4.4.11	Rauchausbeuten	81
4.5	Darstellung der Bemessungsbrände in Programmcodes	83
4.5.1	Flächenquellen	84

4.5.2	Volumenquellen	84
4.5.3	Thermikstrahlen	85
4.5.4	Vereinfachte Ansätze zur Verbrennungsmodellierung	85
4.6	Literatur	86
	Anhang zu Kapitel 4	89
5	Modelle für die Brandsimulation	99
5.1	Zielsetzung der Brandmodellierung und Kapitelüberblick	99
5.1.1	Kapitelüberblick	99
5.1.2	Zielsetzung der Brandmodellierung	99
5.2	Überblick über die verfügbaren Brandmodelltypen	100
5.2.1	Einleitung	100
5.2.2	Mathematische Modelle	101
5.2.3	Physikalische Modelle	102
5.2.4	Grundlegende Vorgaben	102
5.3	Beschreibung der mathematischen Modelle	104
5.3.1	Empirische Korrelationen	105
5.3.2	Vollbrandmodelle	106
5.3.3	Zonenmodelle	110
5.3.4	Feldmodelle (CFD)	115
5.4	Beschreibung der physikalischen Modelle	120
5.4.1	Allgemeines	120
5.4.2	Der Begriff der Ähnlichkeit	121
5.4.2.1	Bewegungsgleichungen und abgeleitete Größen	123
5.4.2.2	Energiegleichungen und abgeleitete Größen	123
5.4.3	Eigenschaften des Plumes und die Archimedeszahl	123
5.4.4	Abbildungsbereich und Abbildungsregeln	125
5.4.5	Hinweise für die Modellierung, Modellmaßstab und Modellgestaltung	126
5.4.6	Besonderheiten bei einzelnen Modelltypen	127
5.4.6.1	Der maßstäblich verkleinerte Brand mit identischer Temperaturabbildung	127
5.4.6.2	Versuche im Maßstab 1:1 (Objektgebundene Versuche)	128
5.4.6.3	Besonderheiten bei Windkanaluntersuchungen	129
5.4.7	Durchgeführte Originalbrandversuche und ihre Modellierung	129
5.4.8	Zusammenfassung	130
5.5	Kriterien für die Modellbewertung	135
5.5.1	Allgemeines	135
5.5.2	Typische Anwendungsfälle und Vergleichsrechnungen	138
5.5.2.1	Plume-Temperatur und Ceiling-Jet	138
5.5.2.2	Beispiele und Experimente für Vergleichsrechnungen	142
5.6	Modellanwendung	149
5.6.1	Auswahl der Szenarien	149
5.6.2	Auswahl des Modelltyps	150
5.6.3	Interpretation der Ergebnisse	151
5.6.4	Anforderungen an die Dokumentation	152
5.7	Literatur	153

Inhaltsverzeichnis

Anhang zu Kapitel 5	157
A5.2 Detaillierte Beschreibung wichtiger Submodelle	158
6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken	175
6.1 Nachweisverfahren	175
6.2 Anwendungsbereiche	175
6.3 Begriffe für Bauteil- und Tragwerksnachweise	178
6.4 Nachweise nach DIN 4102 Teil 4	180
6.4.1 Grundlagen	180
6.4.2 Brandschutztechnische Bemessung	181
6.4.3 Einfluss der europäischen Harmonisierung	182
6.5 Nachweise nach den Brandschutzteilen der Eurocodes	183
6.5.1 Allgemeines	183
6.5.2 Nationale Anhänge (NA)	184
6.5.3 Tabellarische Daten	185
6.5.4 Vereinfachte Rechenverfahren	186
6.5.5 Allgemeine Rechenverfahren	191
6.5.5.1 Allgemeines	191
6.5.5.2 Einwirkungen für die Temperaturberechnung	192
6.5.5.2.1 Allgemeine Regeln	192
6.5.5.2.2 Nominelle Temperaturzeitkurven	194
6.5.5.2.3 Naturbrandmodelle	194
6.5.5.3 Thermische Analyse	196
6.5.5.4 Mechanische Einwirkungen	198
6.5.5.5 Mechanische Analyse	201
6.5.5.6 Abnehmende Bauteiltemperaturen	205
6.6 Beurteilung von Rechenprogrammen	209
6.6.1 Allgemeines	209
6.6.2 Programmverifikation	210
6.6.3 Validierung	210
6.6.4 Testen durch Eichbeispiele	211
6.6.5 Toleranzen	211
6.6.6 Prüfmatrix	212
6.7 Industriebau – Nachweis nach DIN 18230 Teil 1	212
6.8 Zusammenfassung	214
6.9 Literatur	215
7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz	219
7.1 Allgemeines	219
7.2 Brandmeldeanlagen	221
7.2.1 Arten von automatischen Brandmeldeanlagen	221
7.2.2 Wirkung von Brandmeldeanlagen auf das Brandszenario	222
7.2.3 Zuverlässigkeit von Brandmeldeanlagen	224
7.2.4 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Brandmeldeanlagen	226
7.3 Löschanlagen	226

7.3.1	Arten von Löschanlagen	226
7.3.2	Wirkung von Löschanlagen auf das Brandszenario	228
7.3.3	Zuverlässigkeit von Löschanlagen	230
7.3.4	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Löschanlagen	232
7.4	Rauch- und Wärmeabzugsanlagen	233
7.4.1	Allgemeines	233
7.4.2	Wirkung von Rauch- und Wärmeabzügen	234
7.4.3	Zuverlässigkeit von RWA	235
7.4.4	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch RWA	235
7.5	Abwehrender Brandschutz	235
7.5.1	Wirkung von abwehrenden Maßnahmen auf das Brandszenario	235
7.5.2	Alarmierungszeit	238
7.5.3	Hilfsfrist	238
7.5.4	Modell zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit von Löschmaßnahmen	240
7.6	Literatur	241
8	Personensicherheit in Rettungswegen	243
8.1	Lichttrübende Wirkung des Rauches	243
8.2	Erkennungsweite	244
8.3	Die toxische Wirkung von Brandgasen	246
8.4	Die thermische Wirkung von Brandgasen	249
8.5	Anhaltswerte zur Beurteilung der Personensicherheit	252
8.6	Literatur	255
9	Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren	257
9.1	Einleitung	257
9.2	Berechnung von Räumungszeiten	257
9.3	Reaktionszeiten	258
9.4	Entfluchtungsmodelle	262
9.4.1	Abschätzung von Räumungszeiten durch Handrechnungen	262
9.4.2	Dynamische Strömungsmodelle und Netzwerkmodelle	265
9.4.3	Individualmodelle	267
9.4.4	Modellauswahl und Anwendungsgrundsätze	268
9.4.5	Validierung	269
9.5	Verhaltensaspekte	270
9.6	Personenzahl	271
9.7	Literatur	273
10	Risikomethoden und Sicherheitskonzept	277
10.1	Allgemeines	277
10.2	Semi-quantitative Risikomethoden	278
10.2.1	Einführung	278
10.2.2	Index-Methode	280
10.2.3	Ermittlung von Wertigkeiten	282
10.2.4	Fiktives Anwendungsbeispiel	283

Inhaltsverzeichnis

10.3	Quantitative Risikomethoden	285
10.3.1	Einführung	285
10.3.2	Ereignisbaumanalyse	286
10.3.3	Durchführung einer quantitativen Risikoanalyse	289
10.4	Sicherheitskonzept für den konstruktiven Brandschutz	292
10.4.1	Voraussetzungen und Grundlagen	292
10.4.2	Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers	293
10.4.3	Erforderliche Zuverlässigkeit im Brandfall	296
10.4.4	Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandeinwirkung	298
10.4.5	Berücksichtigung unterschiedlicher Brandszenarien	300
10.5	Sicherheitskonzept für Nachweise der Entrauchung	302
10.6	Sicherheitskonzept für Nachweise der Evakuierung	302
10.7	Literatur	303

Anhänge

A.1	Bezeichnungen und Symbole	305
A.2	Anwendungsbeispiel	317
A2.1	Einleitung	317
A2.2	Schutzziele, Brandszenarien und Bemessungsbrände	322
A2.2.1	Schutzinteressen und Schutzziele im Anwendungsbeispiel	322
A2.2.2	Brandszenarien und Bemessungsbrände	323
A2.3	Ermittlung der Brandwirkungen mit Brandmodellen	338
A2.3.1	Fragestellung und Szenario am Beispiel	338
A2.3.2	Modellierung am Beispiel	339
A2.3.3	Ergebnisse	341
A2.4	Brandschutzbemessung der Konstruktion	348
A2.4.1	Tragwerk und Einwirkungen	348
A2.4.2	Materialgesetze	352
A2.4.3	Bemessung der Konstruktion mit Tabellen	354
A2.4.4	Bemessung der Konstruktion mit dem vereinfachten Rechenverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2	355
A2.4.5	Bemessung der Konstruktion mit dem allgemeinen Rechenverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2	357
A2.5	Nachweise der Personensicherheit	363
A2.5.1	Kriterien zum Nachweis der Schutzzielerfüllung	364
A2.5.2	Brandszenarien und Simulation	365
A2.5.2.1	Brand im Hörsaal	365
A2.5.2.2	Brand im Hörsaal mit wirksamer RWA	366
A2.5.2.3	Brand im Hörsaal ohne Entrauchung	367
A2.5.2.4	Brand im Foyerbereich vor dem Hörsaal	368
A2.5.3	Modellierung des Entfluchtungsverlaufs	369
A2.5.3.1	Auslegungsgrundlagen	369
A2.5.3.2	Vorgehensweise	370

A2.5.3.3	Mikroskopische Modellierung	378
A2.5.4	Schlussbetrachtung	380
A2.6	Literatur zu Anhang 2	381
A.3	Mitarbeiter im vfdb-Referat 4	385

VORBEMERKUNG

Das vfdb-Referat 4 „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ hat sich zum Ziel gesetzt, die modernen Ingenieurmethoden des Brandschutzes, die für die Planung und Bewertung von Brandschutzmaßnahmen immer mehr an Bedeutung gewinnen, in einem Leitfaden zusammenfassend zu beschreiben und ihre sachgerechte Anwendung anhand von Beispielen zu erläutern. Der Leitfaden soll auch dazu beitragen, die bisher noch sehr uneinheitlichen Vorgehensweisen und Annahmen bei der Anwendung ingenieurmäßiger Nachweise im Rahmen von Brandschutzkonzepten zu harmonisieren und Fehlanwendungen, z. B. durch Verlassen des abgesicherten Anwendungsbereichs oder Verwenden unzutreffender Eingangsdaten, zu vermeiden.

Die Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) hat das Zusammentragen des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik anfangs in begrenztem Umfang durch eigene Forschungsmittel und eingeworbene Mittel aus der Wirtschaft unterstützt. Danach haben engagierte Referatsmitglieder die regelmäßige Auswertung neuer Veröffentlichungen und die eigenen Untersuchungen zur Erprobung und Überprüfung von Nachweisverfahren ausschließlich in ehrenamtlicher Tätigkeit durchgeführt.

Zwei Internationale Brandschutz-Symposien (IBS) der vfdb wurden genutzt, um den Leitfaden am internationalen Stand von Wissenschaft und Technik des Brandschutzes zu spiegeln. So wurden beim 9. IBS im Mai 2001 in München Zielsetzungen und Anwendungsbeispiele ingenieurmäßiger Nachweise zur Einhaltung bestimmter Schutzziele des Brandschutzes in Referaten anerkannter in- und ausländischer Fachleute unter dem Leithema „Performance Based Codes“ vorgestellt und diskutiert. Beim 10. IBS im Juni 2005 in Hannover wurde unter dem Titel „Fire Safety Engineering“ der erste Entwurf des Leitfadens vorgestellt und mit nationalen und internationalen Experten diskutiert.

Die Ausarbeitungen in den 10 Kapiteln und 3 Anhängen des Leitfadens sind das Ergebnis von Beiträgen zahlreicher Mitarbeiter und intensiver Beratungen in 5 Arbeitsteams (AT) und 4 Ad hoc-Gruppen sowie im ständigen Arbeitskreis (AK) des Referats 4. Stellvertretend seien hier die Federführenden der Arbeitsteams und Ad hoc-Gruppen genannt, in deren Verantwortung die einzelnen Kapitel erstellt wurden:

AT 1	Grundkonzept, Schutzziele, Sicherheit	Dietmar Hosser	Kap. 1-3+10
AT 2	Numerische Brandsimulationsmodelle	Willi Siegfried	Kap. 5
AT 3	Brandszenarien und Bemessungsbrände	Jürgen Wiese	Kap. 4
AT 4	Anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen	Michael Dehne	Kap. 7
AT 5	Personensicherheit, Personenstromanalyse	Volker Schneider	Kap. 8-9
Ad hoc 1	Sicherheits- und Risikofragen	Dietmar Hosser	Kap. 10
Ad hoc 2	Physikalische Brandsimulationsmodelle	Wolfram Arndt	Kap. 5.4
Ad hoc 3	Nachweis baulicher Brandschutzmaßnahmen	Ekkehard Richter	Kap. 6
Ad hoc 4	Redaktion, Harmonisierung	Harald Hagen	
AK	Gesamtkoordination	Dietmar Hosser	Anhänge

Vorbemerkung

Eine Liste der Referatsmitglieder und externen Experten, die an der Erarbeitung des Leitfadens mitgewirkt haben, ist im Anhang 3 abgedruckt. Nähere Informationen zur Arbeitsorganisation und den Zuständigkeiten für die einzelnen Themenbereiche finden sich auf der Homepage des iBMB unter:

http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/index.html?/brandschutz/aktivitaeten/vfdb_neu_1.html

Die redaktionelle Bearbeitung des Leitfadens wurde durch ein Redaktionsteam (Ad hoc 4) mit den Federführenden der einzelnen Kapitel koordiniert und von Mitarbeitern des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig durchgeführt. Allen Beteiligten sei an dieser Stelle für ihr großes Engagement gedankt.

Mein Dank gilt aber auch den Fachleuten aus der Praxis, die nach dem Erscheinen der 1. Auflage im Mai 2006 durch Kommentare, Korrekturhinweise und Verbesserungsvorschläge die Fortschreibung des Leitfadens unterstützt haben. Damit konnten wesentliche Fortschritte gegenüber der 1. Auflage erzielt werden. Beispielsweise wurde der Zusammenhang zwischen Schutzzieilen, Brandszenarien, Nachweisverfahren und Leistungskriterien deutlicher herausgearbeitet und für die ganzheitliche Betrachtung wurde der Einfluss anlagentechnischer Maßnahmen und des Einsatzes der Feuerwehr auf die Brandszenarien, Brandwirkungen und Anforderungen an bauliche Brandschutzmaßnahmen auch quantitativ beschrieben.

Trotzdem wird auch die jetzt vorliegende 2. Auflage des Leitfadens noch nicht allen Wünschen und Erwartungen gerecht werden. Das liegt zum einen daran, dass sich der Stand von Wissenschaft und Technik auf dem vergleichsweise jungen Gebiet der Ingenieurmethoden des Brandschutzes und die einsetzbare Rechentechnik noch stetig weiter entwickeln. Damit werden neue Anwendungsbereiche erschlossen, die durch regelmäßige Aktualisierung des Leitfadens zeitnah berücksichtigt werden müssen. Zum anderen kommt es durch die unterschiedliche Sicht von Anwendern bei Fachplanern, Bauaufsichtsbehörden, Feuerwehren oder Sachversicherern zu abweichenden Präferenzen bei Nachweisen und Eingangsdaten, die bisweilen als Unsicherheiten der Ingenieurmethoden missverstanden werden. Hier können weitere Anwendungsbeispiele mit Empfehlungen und Interpretationen Abhilfe schaffen.

Das vfdb-Referat 4 beabsichtigt, die Sichtung und Verarbeitung des internationalen Standes der Erkenntnisse bei den Ingenieurmethoden des Brandschutzes kontinuierlich fortzuführen und etwa nach 3 Jahren eine 3. Auflage des Leitfadens herauszugeben. Daher hat das Präsidium der vfdb dankenswerter Weise zugestimmt, auch die 2. Auflage des Technischen Berichtes TB 04-01 über das Internet der Fachöffentlichkeit frei zugänglich zu machen. Alle Nutzer des Leitfadens sind herzlich eingeladen, ihre Kommentare zur Anwendbarkeit, zu entdeckten Fehlern und offenen Fragen an die unten angegebene Adresse zu richten.

Braunschweig, im Mai 2009

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Vorsitzender des vfdb-Referats 4
und Herausgeber des Leitfadens

Kommentare und Anregungen bitte per E-Mail an:
d.hosser@tu-braunschweig.de

1 KONZEPT UND ANWENDUNG DES LEITFADENS

1.1 Konzept und Aufbau

Wer Ingenieurmethoden im Rahmen der Erstellung oder Überprüfung eines Brandschutzkonzeptes anwenden möchte, findet in diesem Leitfaden Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Methoden und Eingangsdaten, 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 ingenieurmäßigen 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 oder der Feuerwehr soll er andererseits helfen, diese Auslegung mit möglichst geringem Aufwand zu überprüfen oder Brandschutzanforderungen für die Errichtung und Nutzung des Gebäudes so festzulegen, dass die bauordnungsrechtlichen Schutzziele des Brandschutzes zuverlässig 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 bauordnungsrechtliche Anforderungen nicht wortgetreu umgesetzt werden können. 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.

1 Konzept und Anwendung des Leitfadens

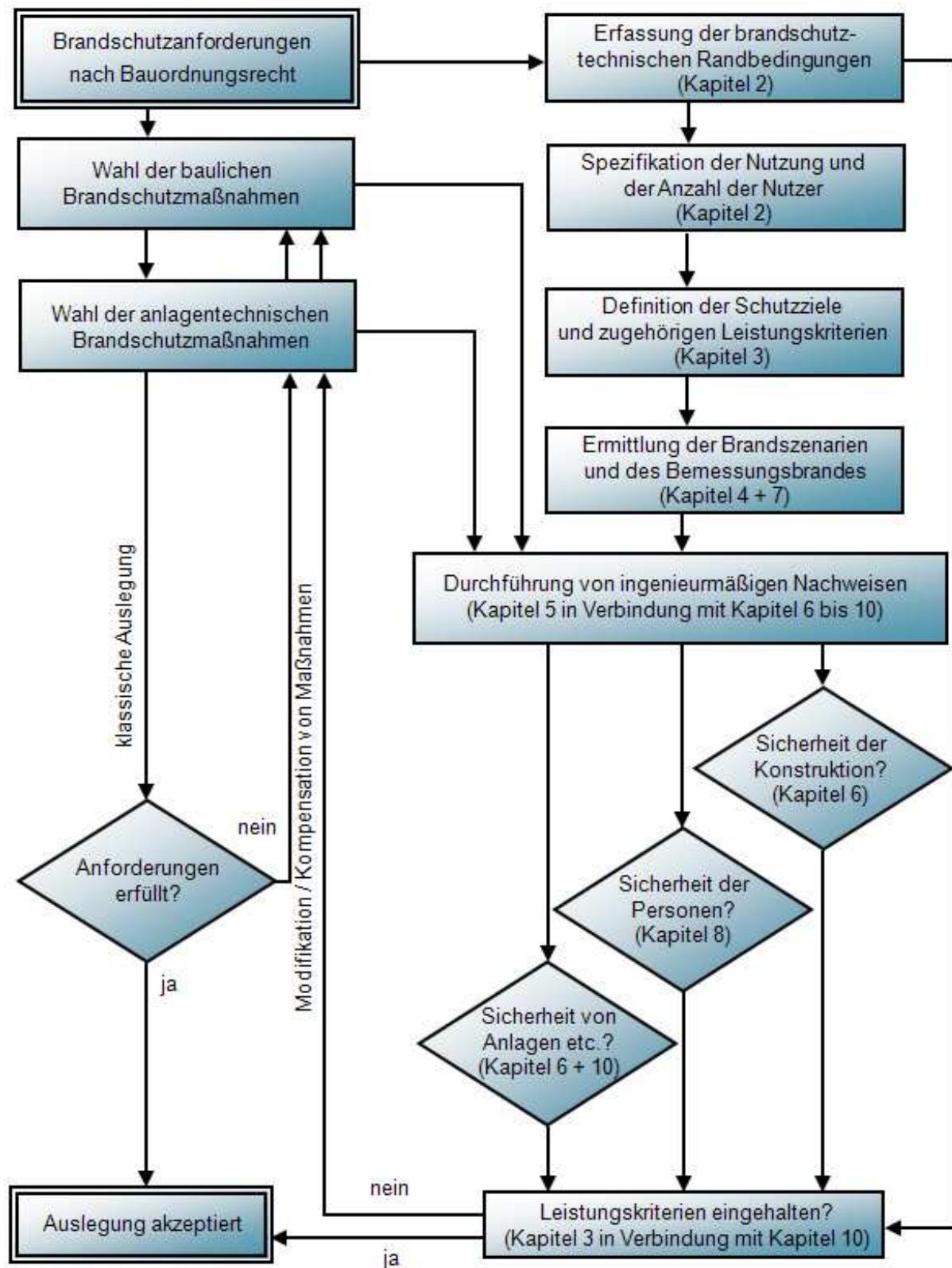


Bild 1.1 Einsatzbereich von Ingenieurmethoden (rechter Bildteil) im Vergleich zu der klassischen Vorgehensweise (linker Bildteil) bei der brandschutztechnischen Auslegung

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 erarbeitet werden, die weitere denkbare Situationen mit abdecken. Dies geschieht in einer qualitativen Analyse, bei der sich zweckmäßiger Weise Bauherr, Planer, Brandschutzingenieur, genehmigende Behörde und Feuerwehr gemeinsam über die allgemeinen und ggf. speziellen Schutzziele (z. B. besondere Anforderungen an die Entfluchtung des Gebäudes) verständigen und grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten skizzieren.

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, ggf. mögliche Nutzungsänderungen)
- Infrastruktur (anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen, Vorkehrungen für den abwehrenden Brandschutz)
- Brandszenarien (mögliche Brandorte und Wege der Brandausbreitung, sonstige Randbedingungen des Brandverlaufs).

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:

1 Konzept und Anwendung des Leitfadens

- Brandszenarien und Bemessungsbrände für brandschutztechnische Nachweise (*Kapitel 4*),
- Nachweisverfahren für Brandwirkungen einschließlich der Rauchausbreitung und Rauchableitung (*Kapitel 5*),
- Brandschutztechnische Nachweise für Bauteile und Tragwerke (*Kapitel 6*),
- Modelle und Daten zur Berücksichtigung anlagentechnischer und abwehrender Brandschutzmaßnahmen (*Kapitel 7*),
- Nachweise zur Personensicherheit bei Brandeinwirkungen (*Kapitel 8*),
- Nachweise zur Entfluchtung im Gefahrenfall (*Kapitel 9*),
- Methoden zur Risikoabschätzung und Festlegung von Sicherheitsanforderungen (*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 Entfluchtungssimulation). 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 Ergebnisse, 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 Schutzzieilen 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: Wärmestrahlung, Wärmetransport (konvektiv und konduktiv), Brandausbreitung, Abbrand, Ventilation, Wärmefreisetzung, 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 Schutzzieilen zugeordnet sind, analysieren. Dazu gehören einerseits Grenzzustände der Tragfähigkeit von Bauteilen und Tragwerken im Brandfall (*Kapitel 6*) und andererseits Grenzzustände der Personensicherheit (*Kapitel 8*) sowie der sicheren Evakuierung (*Kapitel 9*).

Der Leitfaden wird vor allem bei Gebäuden besonderer Art oder Nutzung Verwendung finden, bei denen die auf „Standardgebäude“ ausgerichteten materiellen Anforderungen 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

- Brandwandabständen,
- baulichen Abtrennungen,
- Rettungsweglängen.

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 Schutzz Zielen,
- 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 ERFASSUNG DES GEBÄUDES

2.1 Allgemeines

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

- die Gebäudestruktur,
- den Gebäudeinhalt,
- 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 sollte aus den Zeichnungen 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 ihre Feuerwiderstandsdauer
- Aufteilung des Gebäudes in Abschnitte mit Angaben zur Qualität der Abtrennungen hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer für Wände, Decken, Türen, Dächer sowie Abschlüsse in ihnen,
- Erschließung des Gebäudes von außen und Rettungswege (notwendige Treppenräume und Flure) im Gebäude bis in sichere Bereiche (Rettungsweglängen),
- Anordnung von Treppenräumen, Schleusen (Vorräume) Ausbildung der Konstruktion und Anbindung an die Nutzung in den einzelnen Ebenen des Gebäudes,
- Abtrennung der Flure von den Nutzungen und Treppenräumen, 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,

2 Erfassung des Gebäudes

- Erfassung von Feuerwehraufzügen, Vorräumen und deren Anbindung,
- 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 Wandmaterialien sowie deren Baustoffklassifizierung.

Die in der vorstehenden Übersicht aufgeführten Angaben müssen – soweit zutreffend – bezogen auf das Gebäudekonzept individuell ermittelt oder ggf. aus Erfahrungswerten von vergleichbaren Gebäuden abgeleitet werden.

2.3 Gebäudeinhalt

Die Erfassung des Gebäudeinhaltes ist eine der Grundlagen für die Bewertung eines Gebäudes, da die vorhandene Brandlast sowohl die Dauer als auch die Heftigkeit 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 bestimmd für die Heftigkeit 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 A4.1). Diese Brandlastdichten werden in MJ/m² angegeben und können auch in Holzgleichwerte umgerechnet werden. 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; wegen 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 Wirksamkeit von Löschmaßnahmen erforderlich:

- Löschwasserversorgung für das Gebäude,
- Anzahl und Lage der Steigleitungen (trocken oder nass) im Gebäude sowie der Hydranten außerhalb des Gebäudes,
- Bereiche mit automatischen Brandmeldern, die auf Rauch, Hitze oder Flammen ansprechen und Alarmsysteme, die akustisch wirken,
- Bereiche mit selbsttätigen Löschanlagen (Wasserlöschanlagen, Gaslöschanlagen usw.)
- Bereiche mit automatischen Systemen zur natürlichen Rauchableitung (vertikal bzw. horizontal) bzw. mit maschineller Rauchableitung,
- Bereiche mit Druckbelüftung wie Treppenräume, Schleusen oder Feuerwehraufzüge.

2.5 Umgebungseinflüsse

Bei der Auslegung und Dimensionierung von natürlichen 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, so dass an seinen Seiten und auf dem Dach ein negativer Druck 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 im Bereich der Bundesrepublik Deutschland mit äußeren Temperaturen zwischen - 20 °C und + 30 °C gerechnet 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 Luftsicht 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 Haustechnik 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 Bedingun-

2 Erfassung des Gebäudes

gen sind zusätzliche Untersuchungen bei abgeschalteter Lüftungsanlage durchzuführen, um die Auswirkungen auf den Brandverlauf abschätzen zu können.

2.6 Nutzer

Bei den öffentlich-rechtlichen Schutzzielen 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 Kontakterson 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 Treppenhäuser gelangen, kann bei jungen Menschen und Personen in höherem Alter sehr unterschiedlich sein. Für kranke Menschen, Rollstuhlfahrer oder gehbehinderte 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 Verantwortlichkeit 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 Entfluchtung eines Gebäudes werden in *Kapitel 9* vorgestellt.

3 SCHUTZZIELE 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 Niveau zu erreichen. Veränderungen bezüglich der bisher üblichen Brandschutzmaßnahmen, z. B. Erleichterungen bei den baulichen Brandschutzmaßnahmen oder Einsparungen bei den Einsatzkräften der Feuerwehr, werden zwangsläufig auf die Brandsicherheit durchschlagen – allerdings messbar erst nach statistisch auswertbaren Zeiträumen. Grundlagen und Methoden für eine umfassende Analyse und Bewertung solcher Veränderungen finden sich in [3.13]. 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 dem Arbeitsstättenrecht oder dem Baurecht) und andererseits aus privatrechtlichen Vorschriften und privaten Interessen der Besitzer oder Betreiber eines Gebäudes.

Das Erreichen bauordnungsrechtlicher Schutzziele ist im Rahmen von Brandschutzkonzepten nachzuweisen, die in den Bauordnungen der Länder, z. B. [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.

Für Sonderbauten wird in [3.1] unter anderem gefordert:

- 19. die Pflicht, ein Brandschutzkonzept vorzulegen, ...
- 21. Nachweise über die Nutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall.

Mit der laufenden Nummer 21 ist zum einen das Schutzziel des Personenschutzes weiter in das Zentrum brandsicherheitlicher Bemühungen gerückt worden und zum anderen eine Nachweispflicht für die Nutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall unter Verwendung von Rechenverfahren für besondere Fälle festgelegt worden. Die stärkere Konzentration und klarere Ausrichtung öffentlich-rechtlicher Schutzziele auf die Belange des Personenschutzes muss auch zum Nachdenken über die Anforderungen an die Mittel führen, mit denen die Brandsicherheit rechnerisch nachgewiesen werden soll und mit denen die Brandsicherheit letztlich baulich, anlagentechnisch, betrieblich und abwehrend sichergestellt werden muss.

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

Die Leistungsfähigkeit der Brandschutzmaßnahmen muss den Brandgefahren und Brandrisiken der Gebäude und den Schutzz Zielen 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 durchaus auch von einzelnen konkreten Brandschutzanforderungen der Bauordnung bzw. Verordnung oder Richtlinie für den Sonderbau abweichende Lösungen begründet werden.

Aufbauend auf [3.5 - 3.7] wird nachfolgend 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 Schutzz Zielen 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 Kontrollen, sichergestellt werden müssen. Damit wird ungewollt 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 Schutzz Zielen

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..

Das Risiko kann als Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schadenshöhe definiert werden.

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \cdot \text{Schadenshöhe}$$

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 Eintrittswahrscheinlichkeiten als auch durch ein großes Schadenpotential begründet sein. Je nach Risikoklasse können die im Einzelfall erforderlichen Brandschutzmaßnahmen bzw. die zugehörigen Leistungsanforderungen abgestuft werden.

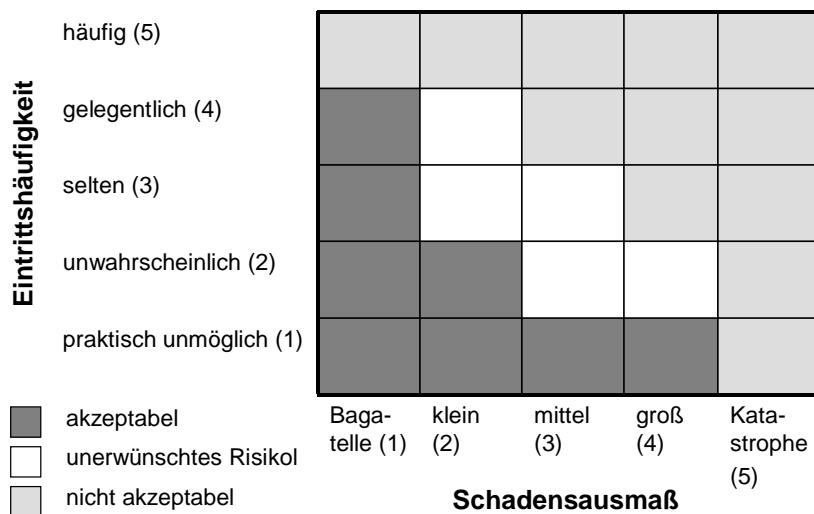


Bild 3.1 Beispiel für die Definition von Risikoklassen (nach VKF, Bern)

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, so dass die „allgemeinen Anforderungen“ der LBO in gleicher Weise erfüllt werden. Hierzu heißt es z. B. in § 3 Abs. 1 der MBO [3.1]:

„Bauliche Anlagen sowie andere Anlagen und Einrichtungen im Sinne von § 1 Abs. 1 Satz 2 sind so anzurichten, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet wird. Die der Wahrung dieser Belange dienenden allgemein anerkannten Regeln der Technik sind zu beachten. Von diesen Regeln kann abgewichen werden, wenn eine andere Lösung in gleicher Weise die allgemeinen Anforderungen des Satzes 1 erfüllt. § 20 Abs. 3 und § 24 bleiben unberührt.“

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:

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

- 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 Bauart von Bauteilen,
- Brandschutzeinrichtungen und -vorkehrungen,
- Feuerungsanlagen, Heizräume, Aufzüge,
- Rettungswege: Flure, Treppenräume, Gänge,
- zulässige Anzahl von Personen / Nutzern,
- Haustechnische Anlagen: Lüftung, Leitungsanlagen,
- Betriebliche / organisatorische Brandschutzmaßnahmen.

3.3 Schutzziele

3.3.1 Allgemeine Schutzziele

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

- Leben und Gesundheit von Menschen,
- Leben und Gesundheit von Tieren,
- Schutz von Sachwerten,
- Schutz der Umwelt
 - Luft (Brandgase)
 - Wasser (Löschwasser)
 - Erdreich (Löschwasser)
 - Vermeidung von Brandschutt,
- Einsatzmöglichkeiten und Sicherheit der Feuerwehren
 - Einsatzgrenzen der Feuerwehren aufgrund beschränkter personeller und materieller Ressourcen; erfahrungsgemäß können nur Brände bis zu einer

Brandfläche von etwa 400 m² durch einen Innenangriff erfolgreich bekämpft werden.

- Persönliche Sicherheit der an Brandbekämpfungs- und Rettungsaktionen beteiligten Personen.
- Einsatzgrenzen aufgrund der Löschwasserversorgung,
- Versicherbarkeit

Das bei Einhaltung von bauordnungsrechtlichen Bestimmungen verbleibende Restrisiko wird üblicherweise den Feuerversicherern übertragen. Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche sowie gesellschaftspolitische Gründe zwingen zu einer Begrenzung dieses Restrisikos.

Der Schutz der oben angeführten Interessen 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 ingenieurmäßige Brandsicherheitsnachweise einen festen Platz im Baugenehmigungsverfahren eingenommen haben, kommt der Konkretisierung von Schutzz Zielen 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,
- Schutzinteressen und Schutzziele,
- Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände,

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

- 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.

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

Tabelle 3.1 Beispiele für eine Konkretisierung von Schutzz Zielen [3.10]

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 zulassen	Akzeptierte Grenzwerte für zulässige Kontamination von Boden, Luft und Wasser

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

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

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

därmäßnahmen 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 Tabelle 3.3 den Brandphasen zugeordnet.

Tabelle 3.3 Zuordnung der Schutzwirkungen von Brandschutzmaßnahmen zu den Brandphasen (vgl. Bild 4.1)

Entstehungsbrand	sich entwickelnder Brand	fortentw. 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		
Fluchtwiege	Fluchtwiege, Rettungswege	Schutzräume	
Feuerlöscher	Hilfsfrist, Feuerlöschanlage, Löschwasserversorgung	Stärke der Feuerwehr, Löschwasserversorgung, Löschwasserrückhaltung	Löschwasserrückhaltung
Fenster / Lüftung / Maschinelle Entrauchung	Rauchabzugsanlagen (MA / NA)	Wärmeabzug	Kaltenrauchung (Rauchverschleppung)
Abschottung (Kapselung von Brandlasten)	Abschottung: Rauchabschnitte	Abschottung (Brandabschnitte)	
	Standsicherheit: Einzelbauteile	Standsicherheit: Konstruktion	Standsicherheit: komplexe Gebäudekonstruktionen
	Funktionssicherheit technischer Einrichtungen		

3.4 Weitergehende Schutzziele

Treten im Einzelfall zu den öffentlich-rechtlichen Schutzzieilen 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 Schutzzieilen 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 Eintretenswahrscheinlichkeit gefährlicher Brände und dem wahrscheinlichen Höchstschaeden) 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 (Abmauerung 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 Schutzzieilen auch dem Sachschutz genügen sollen, müssen die aus den unterschiedlichen Schutzzieilen resultierenden Anforderungen, speziellen Bemessungsbrandszenarien, Leistungs- 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 Regelwerke zur Ausfüllung der allgemeinen Anforderungen, wonach Gebäude so beschaffen sein müssen, dass

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

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

Zu den eingeführten Technischen Baubestimmungen zählt insbesondere die DIN 4102 [3.8], denn die genannten Schutzziele sollen erreicht werden durch Anforderungen hinsichtlich:

- Brandverhalten der Baustoffe,
- Feuerwiderstandsdauer der Bauteile, ausgedrückt in Feuerwiderstandsklassen,
- Dichtheit der Verschlüsse von Öffnungen und
- Anordnung von Rettungswegen.

Mit der DIN 4102 und der Bauregelliste [3.9] 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.

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 (Bemessungsbrandszenario und Bemessungsbrand), Versagensmodell (konkretisiertes Schutzziel / Leistungsanforderung) und Sicherheitskonzept (Sicherheitsfaktoren / 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 ein großer Ermessensspielraum.

Mit den Zeitangaben in Bild 3.1 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

Aspekte werden in Kapitel 8 angegeben. Sie ersetzen bei Nachweisen mit Brandsimulationsmodellen in der Regel die vereinfachten Vorgaben in bauordnungsrechtlichen Vorschriften zur „raucharmen“ Schicht.

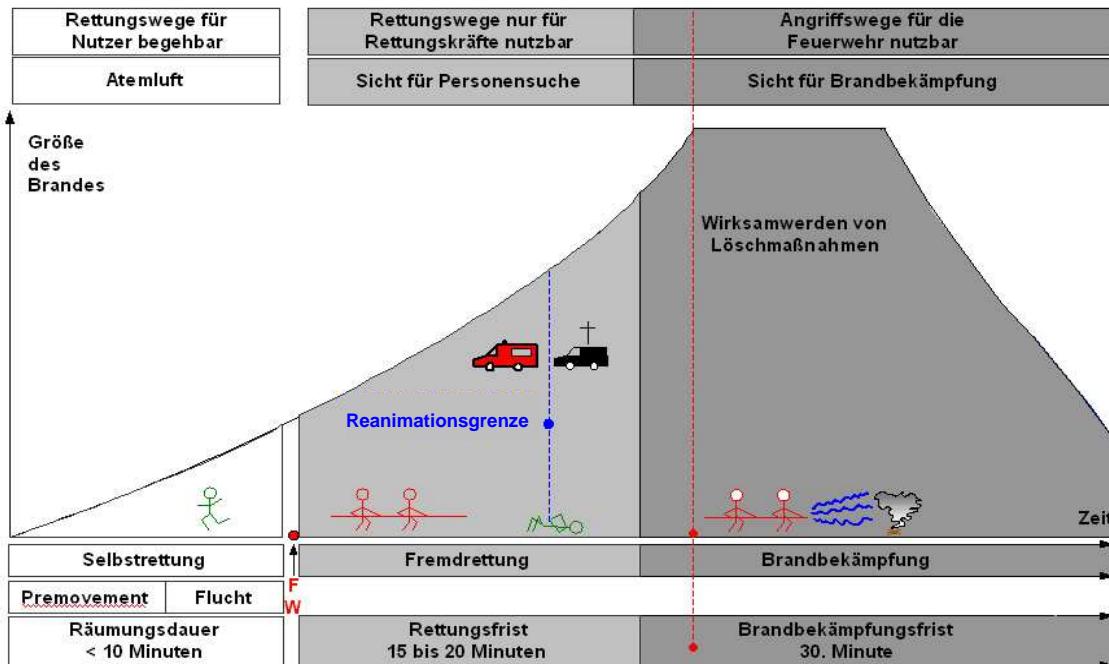


Bild 3.1 Brandphasen mit zugeordneten Hauptnutzungen der Rettungswege und Bedingungen für die Nutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall

3.5.3 Verknüpfung von Schutzzieilen, 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 ingeniermäßigen Nachweise und Kriterien bieten. Da die einzelnen Schutzziele 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.

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 Schutzziele und Sicherheitskriterien

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

Schutzzziel	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	Nachweis der sicheren Benutzbarkeit der Rettungswege für eine definierte Zeitdauer durch: - Erfüllung materieller Anforderungen an die Rettungswege und / oder - Nachweis der Entfluchtung des Gebäudes vor Eintreten kritischer Zustände $t_{Räumung} < t_{verfügbar}$ \Rightarrow siehe Kapitel 9	- Zwei unabhängige Rettungswege - Maximal zulässige Rettungsweglänge - Umfassungsbauteile mit Feuerwiderrstand - Mindestbreiten von Rettungswegegen und Ausgängen - Mindestanforderungen an Baustoffe - $t_{Räumung}$ gemäß Handrechnung oder Entfluchtungssimulation - $t_{verfügbar}$ als Vorgabe oder nach Brandsimulation \Rightarrow siehe Kapitel 5
	Nachweis *) der Personensicherheit bei Einwirkung von - Rauch - (Atem-)Gifte - Hitze *) Nachweis mittels - analytischer Gleichungen - Zonenmodell (Rauch, Hitze) - Feldmodell (alle) \Rightarrow siehe Kapitel 5	- Rauchfreie Schichthöhe oder optische Rauchdichte oder Sichtweite - maximaler FED-Wert, - maximale Gastemperatur oder maximale Wärmestrahlung \Rightarrow Beurteilungswerte siehe Kapitel 8
	Nachweis der Standsicherheit der Konstruktion und des Raumabschlusses der Rettungswegumschließung für die Dauer der Selbst- und Fremdrettung durch: - Erfüllung materieller Anforderungen an Bauteile - Nachweis mittels - vereinfachter Rechenverfahren - allgemeinen Rechenverfahren \Rightarrow siehe Kapitel 6	- tabellarische Daten (DIN 4102-4, Eurocodes, abZ, abP) - z. B. kritische Stahltemperatur - z. B. Tragfähigkeit bei Brandeinw.
Der Brandentstehung vorbeugen	Nachweis der Beschränkung brennbarer Baustoffe: - Verwendbarkeitsnachweis (Norm, abZ, abP) - Versuch	- Normvorgaben - Prüf- und Zulassungskriterien - z. B. Brandschacht, SBI

Tabelle 3.4 Fortsetzung

Schutzziel	Funktionale Anforderung und qualitativer Nachweis	Leistungskriterien für einen quantitativen Nachweis
Der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen	<p>Begrenzung der Brandwirkungen auf eine Nutzung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erfüllung materieller Anforderungen an abtrennende Bauteile - Nachweis der Brandwirkungen ⇒ <i>siehe Kapitel 5</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfkriterien zu Raumabschluss bzw. Rauchdichtheit - Mindestabstand zu Nachbargebäude oder - Normanforderungen an Gebäudeabschlusswand oder Brandwand - z. B. maximale Temperatur oder Wärmestrahlung
Wirksame Löscharbeiten ermöglichen	<p>Standsicherheit der Konstruktion und Raumabschluss der Angriffswege für die Dauer der Löscharbeiten durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erfüllung materieller Anforderungen an Bauteile - vereinfachte Rechenverf. - allgemeine Rechenverf. <p>⇒ <i>siehe Kapitel 6</i></p> <p>Bereitstellung von Flächen für die Feuerwehr</p> <p>Nachweis der ausreichenden Löschwassermenge</p> <p>Bereitstellung von Brandbekämpfungseinrichtungen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Selbsthilfeanlagen - Steigleitungen - Löschhilfeanlagen <p>Frühe Branderkennung und -meldung</p> <p>Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse durch Rauchableitung</p> <p>⇒ <i>siehe Kapitel 5</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - tabellarische Daten (z. B. DIN 4102, Eurocodes, abZ, abP) - z. B. kritische Stahltemperatur - z. B. Tragfähigkeit bei Brandeinw - Normanforderungen - Löschwasserbedarf nach DVGW W405 - z. B. Feuerlöscher nach ASR 13/1.2 - modifizierte Anforderungen ⇒ <i>siehe Kapitel 7 und 10</i> - z. B. Mindestrauchabzugsflächen - Grenzwerte für optische Dichte bzw. Sichtweite ⇒ <i>Beurteilungswerte siehe Kapitel 8</i>
<p>Öffentliche Sicherheit und Ordnung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen 	<p>Verhinderung der Kontamination der Umwelt (Luft, Boden, Gewässer) durch</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erfüllung materieller Anforderungen (z.B. Löschwasserrückhaltung) - Nachweis der Schadstoffentstehung/-ausbreitung (Störfallanalyse) 	<ul style="list-style-type: none"> - Feuerwiderstandsklasse der Bauteile - maximale Lagermengen - zulässige Schadstoffkonzentration ⇒ <i>Beurteilungswerte siehe Kapitel 8</i>

3.6 Hinweise zum Sicherheitsniveau bei Nachweisen mit Hilfe des Leitfadens

Der Brandfall ist eine außergewöhnliche Situation, die mit einer vergleichsweise geringen Wahrscheinlichkeit innerhalb der Nutzungsdauer eines Gebäudes auftritt. Für eine außergewöhnliche Situation werden normalerweise 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. [3.14]) 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 extremer Einwirkungen höchst unwahrscheinlich ist. Als charakteristische Werte werden in der Regel nicht die Erwartungswerte verwendet, sondern zur sicheren Seite hin erhöhte bzw. abgemindeerte Fraktilen.

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 Wärmefreisetzungsraten unter Berücksichtigung ihrer Streuungen als obere Fraktilen vorzugeben. In Anlehnung an DIN 18230-1 [3.3] wird in diesem Leitfaden von 90 %-Fraktilen ausgegangen (in der internationalen Literatur werden 80 %- bis 95 %-Fraktilen 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.
- Als Vergleichsmaßstab für die anzustrebende Konservativität der rechnerisch zu ermittelnden Brandedeinwirkung kann die Einheitstemperaturzeitkurve 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 8.2) 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
- [3.2] vfdb-Richtlinie 01-01 „Brandschutzkonzept“, Ausgabe April 2008.
- [3.3] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Ausgabe Mai 1998.
- [3.4] Muster-Industriebaurichtlinie – M IndBauRL, März 2000.
- [3.5] WIESE, J.: Design Fires – eine Grundlage für Brandsimulationen. VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren, 1996.
- [3.6] REICHELT, P.; WIESE, J.: Erstellen von Gesamtbrandschutzkonzepten und deren Bewertung unter Verwendung von ingenieurmäßigen Brandsicherheitsnachweisen. VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren, 1998.
- [3.7] Bemessungsbrände für Brandsimulationen und Brandschutzkonzepte. VdS 2827 (2000-05(01))
- [3.8] DIN 4102. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- [3.9] Bauregelliste, Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik.
- [3.10] ISO / TC 92 / SC 4: Fire Safety Engineering: Design Fire Scenarios and Design Fires.
- [3.11] BAMERT, E.: Kriterien zur Festlegung brandschutztechnischer Anforderungen aus der Sicht der Versicherer. In: VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz, 1995.
- [3.12] DEHNE, M.; VAN LIER, M.: Zusammenwirken von baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen. Modelle für die Flucht und Rettung von Personen. In: vfdb-Jahresfachtagung 2. - 4. Juni 2004 in Essen.
- [3.13] DEHNE, M.: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig, Heft 169 (2003).
- [3.14] DIN 1055 Teil100: Einwirkungen auf Tragwerke; Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. Ausgabe März 2001.

4 BRANDSzenARIEN UND BEMESSUNGSBRÄNDE

4.1 Einleitung

Dieses Kapitel befasst sich mit den Festlegungen, die vor der Durchführung von rechnerischen Untersuchungen erforderlich sind, um das notwendige Zahlenmaterial (Eingangsdaten) bereitstellen zu können. Das hier angesprochene Datenmaterial dient der Festlegung und konkreten Beschreibung der maßgeblichen Brände. Was maßgebend ist, hängt auch von der Aufgabenstellung ab. Die nachfolgend beschriebenen Vorgehensweisen zur angehöerten Beschreibung der Brände sind erforderlich, weil die im realen Gebäude zu erwartenden Brände selber (zurzeit noch) nicht ausreichend sicher vorherrechenbar sind und weil diese Eingangsdaten das Rechenergebnis und damit die als erforderlich erachteten Brandschutzanforderungen erheblich beeinflussen können.

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

Rechnergestützte Untersuchungen bedürfen diverser Vorarbeiten („quantitativen Analysen“, s. Kapitel 1) u. a. mit dem Ziel, für das jeweilige Gebäude und die anzunehmenden Nutzungsverhältnisse zunächst maßgebende Brandereignisse (**fire scenarios**, Brandszenarien) zu finden und zu beschreiben. Dies betrifft insbesondere den Brandort innerhalb des Gebäudes und die Begleitumstände im näheren Umfeld des Brandherdes (Zündinitial, Brandentwicklung). Dabei müssen Informationen über die Beschaffenheit des Gebäudes einschließlich seiner haustechnischen und brandschutztechnischen Einrichtungen beachtet werden. Der Brand und seine Entwicklung (Zündung, Ausbreitung) werden hierfür unter Berücksichtigung entscheidender Brandlasten (Art und Menge brennbarer Stoffe; Lagerungsart), annehmender Ventilationsverhältnisse und äußerer Einwirkungen (Löschmaßnahmen) zunächst ebenfalls näherungsweise umrissen und die zugehörigen Annahmen festgelegt (verbal beschrieben).

Ziel ist die Ermöglichung auf der sicheren Seite liegender Berechnungen. Mit den Rechenannahmen müssen alle wahrscheinlichen Brände abgedeckt werden; dies bedeutet für die Anwendungspraxis eine Berücksichtigung von etwa 90 % bis 95 % aller möglichen Brandszenarien und Brandverläufe. 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 üblicherweise auf der Basis von „worst credible“ - Szenarien und Annahmen, deren Randbedingungen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit auch während der gesamten Lebensdauer des Gebäudes eintreten können.

Im Bauwesen werden unsichere Brandgrößen häufig durch Fraktilwerte anstelle von ihren stochastischen Kenngrößen, wie im Falle der Gauss-Normalverteilung Mittelwert μ und der Standardabweichung σ beschrieben. Liegt für eine Größe eine statistisch belastbare Menge an möglichen Werten für den Brandfall vor, lässt sich ihre Häufigkeit durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(x)$ und ihre Verteilung durch die Verteilungsfunktion $F(x)$ entsprechend beispielsweise einer Gauss-normalverteilten Größe (s. Bild 4.1) beschreiben. Liegen

die Art der Verteilung der Brandgröße und die dazugehörigen stochastischen Parameter vor, lassen sich beliebige Fraktile für die Verteilung berechnen. In Bild 4.1 ist die 90 % Fraktile einer Gauss-normalverteilten Größe dargestellt, d. h. 90 % der Werte der Verteilungsfunktion $F(x)$ liegen unter diesen Wert.

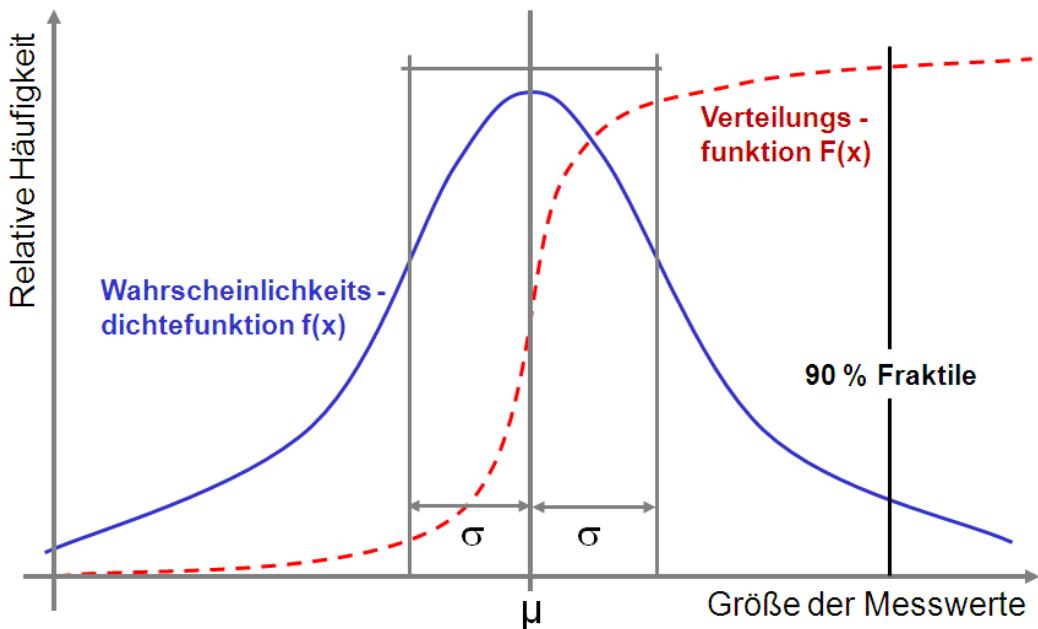


Bild 4.1 Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ - und Verteilungsfunktion $F(x)$ einer Normalverteilung, Darstellung der 90 % Fraktile, μ Mittelwert (Erwartungswert), σ Standardabweichung

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 Löschaßnahmen) 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 Bemessungsbrand-Szenarien müssen quantifizierte Brandverläufe festgelegt werden (Konkretisierung von Bemessungsbränden, *design fires*). Dafür sind die entsprechenden physikalischen Kenngrößen zu beziffern. Das Datenmaterial dieses Kapitels vermittelt solide Anhaltspunkte zur objektspezifischen Konkretisierung der anzusetzenden Brände.

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

Für eher spezielle Fragestellungen - zum Beispiel, wenn nur die thermische Bauteilbelastung zu untersuchen ist - können teilweise auch vereinfachte Verfahren genutzt werden. Dabei

könnte das Brandszenario unter Umständen auch nur als Temperatur-Zeit-Kurve dargestellt werden ohne einen detaillierten Bemessungsbrand mit zeitabhängiger Freisetzung von Energie und Brandprodukten.

4.1.1 Grenzen der Modellierbarkeit von Brandereignissen und Sicherheitsaspekte von Bemessungswerten

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. Kriterien für die Wahl objektspezifischer Brandszenarien sind im Anhang (Tabellenanhang) zu Kapitel 4 in Tabelle A4.4 zusammengestellt.

4.2 Begriffe

4.2.1 Begriffserläuterungen

Die nachfolgende Übersicht (Tabelle 4.1) fasst die wesentlichen der in Kapitel 4 verwendeten Begriffe unter Angabe einer kurzen Definition bzw. Beschreibung zusammen. Die Begriffe sind nicht alphabetisch, sondern in thematisch zusammengehörigen Gruppen angeordnet. Formelzeichen für wichtige Kenngrößen zur Beschreibung von Bemessungsbränden werden in Tabelle 4.3 gegeben, weitere häufig eingesetzte Formelzeichen und Dimensionen im Anhang des Leitfadens

4.2.2 Allgemeine Hinweise zur Auswahl von Kenngrößen

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 DIN 18230-3, Referenz [4.13] oder dem SFPE-Handbook [4.3] entnommen werden. Andere Quellen bzw. vereinfachte pauschalisierte Ansätze sind möglich, soweit ihre Anwendbarkeit auf das konkret vorliegende Brandszenario belegt werden kann.

In dem Anhang zu Kapitel 4 (Tabellenanhang¹) 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 ausgewählt, die den experimentellen Erfahrungen der Autoren dieses Kapitels entsprechen. Auf Zitate von Literaturdaten, die Extremwerte darstellen, wurde verzichtet². Weiterführende Literaturhinweise schließen sich an. Bei der Benutzung von Literaturdaten ist zu beachten, dass stets die Randbedingungen mit dem konkreten Anwendungsfall zu vergleichen sind.

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.

Tabelle 4.1 Begriffserläuterungen

Begriff	Erläuterung
Bemessungsbrand (engl.: design fire)	Quantitative Beschreibung eines bemessungsrelevanten Brandverlaufs durch die (in der Regel zeitabhängige) Wärmefreisetzungsräte bzw. Abbrandrate sowie gegebenenfalls weitere Brandkenngrößen wie z. B. die Ausbeute an Verbrennungsprodukten oder das Rauchpotential. Im Zusammenhang mit einem (rechnerischen) Nachweisverfahren spricht man auch von der Festlegung eines geeigneten Quellterms.
Brandszenarium	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 versteht man unter einem Brandszenarium die Anfangs- und Randbedingungen, die für die Durchführung eines (rechnerischen) Nachweises mit einem geeigneten Modell nötig sind.
Bemessungsbrandszenarium	Ein Brandszenarium, das auf einem geeignet festgelegten Bemessungsbrand basiert.
Quellterm	Der „Quellterm“ beschreibt den Ort und die Charakteristik der zeitlichen Entstehung von freiwerdender Energie, chemischen Produkten, Rauchpartikeln, Verbrauch („Senke“) von Sauerstoff usw.. Unter Umständen kann er mit Parametern wie vertikale und horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit, Zündtemperatur, flächen-spezifische Wärmefreisetzungsräte usw. umschrieben werden. Hierzu gehören die in Tabelle 4.3 zusammengestellten Kenngrößen. Weiterhin können vereinfachte pauschalisierte Ansätze als Quellterm fungieren.
Brandphasen	Einteilung (oft schematisch) des Brandverlaufs in bestimmte Abschnitte (Phasen), die ein oder mehrere charakteristische gemeinsame Merkmale aufweisen.
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.
Entstehungsbrand	Der Brand ist räumlich lokalisiert. D.h. er ist auf ein Objekt oder eine zusammenhängende räumlich eng begrenzte Objektgruppe beschränkt.

Begriff	Erläuterung
Brandausbreitung	Brandübertragung von dem Bereich des Entstehungsbrandes auf umgebende brennbare Objekte. Die Brandwirkung steigt mit der Zeit stetig an.
Vollbrand	Am Brand beteiligen sich alle in einem Raum vorhandenen brennbaren Stoffe.
Flashover	Sehr schneller Übergang zu einer Brandphase, in dem die gesamte Oberfläche der brennbaren Materialien in einem geschlossenen Raum am Brand beteiligt ist.
Abklingphase	Nach dem Abbrand von ca. 70 % der Brennstoffmasse verringert sich die Wärmefreisetzungsr率e bis zu dem Zeitpunkt, an dem das gesamte Material verbrannt ist.
Backdraft	Schlagartiges Entzünden von in einem Raum eingeschlossenen heißen gasförmigen Produkten aus unvollständiger Verbrennung durch plötzliche Luftzufuhr.
Schwelbrand	Unvollständige Verbrennung bei ungenügender Sauerstoffzufuhr, ohne Flammenbildung oder Lichterscheinung
Glimmbrand	Unvollständige Verbrennung bei ungenügender Sauerstoffzufuhr, ohne Flammenbildung, jedoch mit Lichterscheinung
äquivalente Branddauer (nach DIN 18230)	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.
Brandausbreitungsgeschwindigkeit	Fortbewegungsgeschwindigkeit der Flammenfront in der Brandausbreitungsrichtung und damit ein Maß für die Zunahme der Brandfläche in der Brandentwicklungsphase; Wird meist als radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit angegeben (kreisförmige Brandfläche), kann jedoch auch für bestimmte Anwendungen als Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang bestimmter Vorzugsrichtungen (z. B. horizontale Dimensionen x bzw. y) festgelegt sein. Gegebenenfalls auch als vertikale (z-Richtung) Ausbreitungsgeschwindigkeit definiert.
brandlastgesteuerter Brand	Die Abbrandrate wird nur durch die Stoffeigenschaften und die thermische Einwirkung der Umgebung limitiert. Es steht ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung. Abbrandrate ist gleich der Pyrolyserate.
ventilations- bzw. lüftungsgesteuerter Brand (auch: unterventilierter Brand)	Die Abbrandrate wird durch die im Brandbereich verfügbare Luft (Sauerstoff) begrenzt. D. h. die brandlastgesteuerte Verbrennung kann nicht aufrechterhalten werden. Es kommt zur Ausbreitung und gegebenenfalls Sekundärzündung unverbrannter Pyrolyseprodukte.

4.3 Bemessungsbrand-Szenarien

4.3.1 Allgemeines

Die Bemessungsbrandszenarien ergeben sich aus der planmäßigen physikalischen Wirkung der vorgesehenen / vorhandenen aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen. Der Ausfall dieser Maßnahmen ist Bestandteil der Risikobewertung und mündet in die Festlegung von Sicherheitsbeiwerten im Sicherheitskonzept.

Als „Sonderfall“ können auch Szenarien deterministisch analysiert werden, bei denen einzelne oder mehrere der vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen ausfallen und nicht bestimmgemäß funktionieren. Diese Fälle werden in der Regel nicht für die Begründung von Brandschutzkonzepten betrachtet sondern zur Abschätzung von Brandfolgen außergewöhnlicher Szenarien im Rahmen der Risikobetrachtung („Dennoch-Fall“).

Aufgrund der Festlegungen der Bemessungsbrand-Szenarien ergeben sich Bemessungsbrände, die den rechnerischen Brandsimulationen zugrunde gelegt werden. Im Zuge der Berechnungen können Verhältnisse aufgezeigt werden, 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 Heißgassschicht, dass 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.

4.3.2 Grundsätze zur Identifizierung der maßgeblichen Bemessungsbrand-Szenarien

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

Folgende Einflussfaktoren sind bei der Identifizierung des bzw. der maßgeblichen Bemessungsbrand-Szenarien mindestens zu berücksichtigen:

- a) Unveränderliche Parameter aus dem Objekt
 - Brandraumgeometrie,
- b) Variable Parameter
 - Art (Brandlast, brennbare Stoffe), Größe und Lage des Brandherds (der Brandquelle),
 - Zündquellen / Zündinitiale sowie Art und Lagerung der zuerst in Brand geratenen Stoffe / Gegenstände für die Betrachtung „lokaler Brandszenarien“

- Art des Brandes (Brandentstehungsphase, 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 (beispielhaft: Brandstiftung mit mehreren Brandentstehungsorten und Brandbeschleuniger)
 - Szenarien, bei denen vorgesehene Brandschutzmaßnahmen nicht oder nicht bestimmungsgemäß funktionieren

4.3.3 Identifizierung der maßgeblichen Bemessungsbrand-Szenarien

Aufgrund unterschiedlicher Schutzziele und Schadensausmaße sind i. d. R. unterschiedliche Bemessungsbrand-Szenarien für unterschiedliche Schutzziele maßgeblich.

Für die erste Orientierung kann folgende Zuordnung verwendet werden:

- Personenschutz-Aspekte der Nutzer:
Phase der Vorbrennzeit wird vernachlässigt und ist Bestandteil der Sicherheitskonzeption / zusätzliche Sicherheitsreserve, die nicht durch Brandsimulationen über der Zeit quantifiziert wird.
- Fremdrettung:
Das Erfordernis und die Konkretisierung der Schutzziele erfolgt im Brandschutzkonzept unter Beachtung objektspezifischer Kriterien. Hierauf ist unmittelbar Bezug zu nehmen.
- Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten durch die Feuerwehr:
Grundsätzlich gehen Brandschutzkonzepte bei der Bewertung der Wirksamkeit von manuellen Löschmaßnahmen vom Innenangriff der Feuerwehr aus.
- Standsicherheit und Raumabschluss im Brandfall:
Fort- und vollentwickelte Brände, die im Allgemeinen bei „kleinen“ Räumen als Vollbrände in ganzen Raum und bei „großen Räumen“ als lokal begrenzte Brände in Erscheinung treten.
- Sachwertschutz:
Die Konkretisierung der Schutzziele hängt stark vom Einzelfall ab; hierfür können keine allgemeingültigen Hinweise angegeben werden.

4.3.4 Systematische Auswahl von Bemessungsbrand-Szenarien

In Vorbereitung einer rechnerischen Brandsimulation können die zu betrachtenden Bemessungsbrand-Szenarien durch eine systematische Bewertung der „variablen Parameter“ festgelegt werden. Zunächst werden mögliche / denkbare Brandszenarien gesammelt und anschließend im Hinblick auf ihre Auftretens-Wahrscheinlichkeit und die schutzzielbezogenen

Schadenausmaße bewertet. Dazu sind in der Regel für jedes Brandszenarium 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 angenommen werden. Dabei werden sogenannte „worst credible“ Szenarien gewählt (s. Abschnitt 4.1).

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 Brandausbreitungs-Phase) und ggf. die zuerst in Brand gesetzten Gegenstände werden festgelegt.
- Aus den Angaben ergibt sich für den Bemessungsbrand insbesondere 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 primär relevante Brandphase benannt und festgelegt, ob es sich um einen brandlastgesteuerten Brand (ausreichend Verbrennungsluft vorhanden) oder um einen ventilationsgesteuerten Brand handelt.

5) Einfluss der Anlagentechnik auf den Brandverlauf und das Brandszenarium

- Bei Berücksichtigung anlagentechnischer Maßnahmen (z. B. automatische Feuerlöschanlagen wie Sprinklerung) ist eine Begrenzung der "ungestörten" Brandausbreitung möglich. Dazu müssen Kriterien für die Aktivierung dieser Anlagetechnik festgelegt werden und deren 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. Kapitel 10). Es wird grundsätzlich von der erwarteten Wirksamkeit aller Sicherheitsmaßnahmen ausgegangen³.

³ 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, Risiko-Analyse).

6) Feuerwehrangriff

- 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 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 ingenieurmäßige Bewertung und Einbindung der Feuerwehr in Brandsimulationen verwendet werden (s. Kapitel 7).

7) Abschätzung des zu erwartenden Schadens

- Die zu erwartenden Brandfolgen / Schadenbilder des Brandszenariums sind zu beschreiben und zu bewerten.
- Gesamtbewertung und Auswahl des Bemessungsbrand-Szenariums
- 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 Eintretenswahrscheinlichkeit der Ereignisse mit den erwarteten Schadenhöhen multipliziert. Dies geschieht in der Regel auf der Grundlage von verfügbarem Expertenwissen / Einschätzungen („expert judgement“).

4.3.5 Bemessungsbrandszenarien für die Nutzung der Rettungswege durch die Gebäudebenutzer

Für die Bemessung der Entrauchungsmaßnahmen bzw. für den Personenschutz sind i. d. R. abhängig von der Brandraumgeometrie mehrere Szenarien zu untersuchen bei denen die Brandausbreitung (niederenergetischer Brand mit ca. $Q_s = 25 \text{ kW}$ sowie ein möglicher hochenergetischer Vollbrand) sowie die Ventilationsbedingungen (unventillierter Brand mit niedriger Energiefreisetzungsr率 sowie ein ausreichend ventillierter Brand mit max. Energiefreisetzungsr率 (vgl. Bauteilauslegung)) die wesentlichen Einflussparameter darstellen.

Ziel ist die Überprüfung der Kriterien zum Nachweis Personenschutz (siehe Kapitel 3 und Kapitel 8). Diese zahlenmäßigen Vorgaben (Maxima, Minima) für diese Kriterien können insbesondere mit zeitlichen Vorgaben (Einhaltung von maximaler Dauer) gekoppelt sein.

4.3.6 Bemessungsbrandszenarien für die Fremdrettung durch die Feuerwehr

Unter Fremdrettung wird hier die „planbare Fremdrettung“ verstanden, bei der die Einsatzkräfte der Hilfsdienste (der Feuerwehr) Personen aus einem von einem Brandgeschehen betroffenen Gebäude retten. Grundsätzlich kann dieser Fremdrettungsprozess nur für solche Gebäudeteile zuverlässig erfolgreich durchgeführt werden, die selber nicht unmittelbar vom Brand betroffen sind; also für Nutzungseinheiten und Gebäudeteile, in denen sich der

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Brandherd nicht befindet. Typisches Beispiel für die „planbare Fremdrettung“ ist die Räumung von nicht unmittelbar betroffenen Wohnungen oder Hotelzimmern über verrauchte Flure mit Unterstützung der Feuerwehr.

Tabelle 4.2 Szenarien für „planbare“ Fremdrettungen

Aspekt	Beschreibung	Bemerkungen
zu bewertender Gebäudebereich	insbesondere die betroffenen Rettungswege für die zu räumenden Bereiche	keine
Zielgröße	Nutzbarkeit der Rettungswege aus den nicht unmittelbar betroffenen Nutzungseinheiten	keine
Randbedingungen für die Nutzung der Rettungswege	Die Rettungswege werden für die betroffenen Personen durch die Hilfskräfte nutzbar gemacht. Dazu verwendet die Feuerwehr ihre üblichen Einsatzmittel.	Fluchthauben, Druckventilatoren, Leitern der Fw
Brandverlauf	Der Brand - in der anderen Nutzungseinheit - wird von anderen Einsatzkräften zeitgleich bereits bekämpft. Hier ist auch von einem Ausbleiben nachhaltiger Löscherfolge auszugehen.	Brand in anderer Nutzungseinheit
Anordnung der betroffenen Rettungswege	Grundsatz für Nutzungseinheiten ohne eigene „notwendige Flure“: Jede Nutzungseinheit muss mindestens einen eigenen Rettungsweg haben, der von anderen Nutzungseinheiten unabhängig ist. Dieser Rettungsweg ist ein baulicher. Nutzungseinheiten in Verbindung mit notwendigen Fluren können nicht nutzbare Rettungswegteile (Flurabschnitte oder Treppenräume) haben und sind auf Fremdrettung ggf. angewiesen.	Grundsatz: der erste Rettungsweg der betrachteten NE ist unabhängig und verfügbar sowie nutzbar.
Bedingungen für das Auffinden von Personen	Die zu rettenden Personen befinden sich geschützt in der nicht unmittelbar vom Brandereignis betroffenen Nutzungseinheit. Hier liegt keine unmittelbare Brandeinwirkung vor: Luftqualität und Sichtverhältnisse sind hier nicht vom Brand beeinflusst.	Ziel-Nutzungseinheit ist unbeeinflusst.

Für Personen, die sich in einer unmittelbar von einem Brandgeschehen betroffenen Nutzungseinheit aufhalten, muss die Personensicherheit während der Selbstrettungsphase - grundsätzlich ohne fremde Hilfe durch externe Stellen - nachgewiesen werden. Dafür müs-

sen die Rettungswege ausreichend lange verfügbar und nutzbar sein⁴. Bemessungsbrandszenarien sind vorrangig für dieses Ziel auszuwählen. Sofern einzelne Personen in ihrer Mobilität eingeschränkt sind und in so fern fremder Hilfe bedürfen (z. B. behinderte Personen), müssen sie diese Hilfe aus der (betrieblichen) Infrastruktur des Gebäudes erhalten und nicht durch externe Kräfte (z. B. Feuerwehr). Davon ist unmittelbar insbesondere die erforderliche Räumungsdauer betroffen, was bei der Szenarienauswahl zu berücksichtigen ist.

Für Personen, die diese Selbstrettungs-Phase nicht nutzen (können), werden grundsätzlich keine besonderen Brandschutzmaßnahmen – zur Erfüllung der Schutzziele des Bauordnungsrechts – ergriffen. Ihre Fremdrettung ist den situationsbedingten Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehr unterworfen (nicht planbare Fremdrettung) und fällt unter das „Restrisiko“ des Brandschutzkonzeptes. Hierfür werden dem entsprechend in der Regel auch keine Bemessungsbrandszenarien festgelegt. Im Rahmen von Risikobewertungen kann allerdings sehr wohl anhand von rechnerischen Analysen überprüft werden, wie sich in diesen Fällen die Arbeitsbedingungen für die Feuerwehr einstellen werden; für die hierfür erforderlichen Szenarienauswahl gelten die oben genannten Grundsätze unverändert.

Hinweise zur szenarienbezogenen Auswertung der Schutzzielkonkretisierung:

Insbesondere für Sonderbauten mit großen Personenzahlen (Versammlungsstätten, Schulen und Hochschulen, Verkehrsanlagen wie Bahnhöfe, Flughafenterminals, Verkaufsstätten und ähnliche) muss davon ausgegangen werden, dass nach öffentlich-rechtlichen Sicherheitskriterien keine Fremdrettung durch externe Stellen erforderlich ist und dass sich alle Nutzer bereits während der Selbstrettungsphase in Sicherheit bringen können. Das trifft ausdrücklich auch für solche Sonderbauten zu, deren Nutzer typischerweise hilfebedürftig sind (Krankenhäusern, Alten- und Pflegeheime, Kindergarten und ähnliche); hier ist die brandschutztechnische Infrastruktur des Betreibers in der Pflicht, die Selbstrettungsphase für die betreffenden Personen zu nutzen (ohne dabei externe Hilfskräfte planmäßig einzuplanen).

4.3.6.1 Szenarien und Bewertungskriterien für „planbare Fremdrettungen“

Als Standardfall des Bauordnungsrechts, bei dem eine „planbare Fremdrettung“ gegeben ist, ist zunächst eine Situation mit mehreren **Wohnungen** (Nutzungseinheiten) zu nennen, die am gleichen notwendigen Flur oder notwendigen Treppenraum angeordnet sind. Hier muss der „zweite Rettungsweg“ entweder über die Leiter der Feuerwehr oder über den verrauchten notwendigen Flur von der Feuerwehr verfügbar gemacht werden.

Die Verrauchung muss als so stark angenommen werden, dass auf diesen Rettungswegen weder gute Sichtverhältnisse gegeben sind noch atembare Luft zur Verfügung steht.

Die Temperaturen im Flur müssen allerdings so gering sein, dass sich Einsatzkräfte hier im Rahmen der ihnen zumutbaren Risiken aufhalten können:

⁴ Hier sind vorwiegend Sonderbauten betroffen, für die die Rettungswege baulich sichergestellt werden und nicht über die Einsatzmittel der Feuerwehr.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

- Temperatur im „Bewegungsraum“⁵: bis zu etwa 90 °C
- Temperatur in einer sich ggf. ausbildenden heißen Schicht: aus der heißen Schicht darf keine Wärmestrahlung > 2,5 kW/m² resultieren (kleinere Werte für längere Aufenthaltsdauern als 5 min; siehe Kapitel 8).

4.3.6.2 Fremdrettung über die Leitern der Feuerwehr

Die „Leiterwege“ können im Brandfall sowohl von Feuer (Flammen aus tieferen Geschossen) als auch vom Brandrauch (aus den Fenstern der betroffenen Nutzungseinheit) unmittelbar belastet werden.

Die im Brandschutzkonzept vorgesehenen „anleiterbaren Stellen“ sollten so ausgewählt worden sein, dass eine unmittelbare Gefährdung der „Leiterwege“ nicht zu befürchten ist. Eine Beurteilung der Gefährdung mit den Mitteln des Brandschutzingenieurwesens ist hier in der Regel nicht sinnvoll für Szenarien, bei denen Feuer und Rauch unmittelbar auf die „Leiterwege“ einwirken.

4.3.6.3 Fremdrettung aus „Schutzräumen“ innerhalb von Gebäuden

Das Brandschutzkonzept kann in Einzelfällen vorsehen, für bestimmte Personengruppen „Schutzräume“ innerhalb des Gebäudes zu schaffen, in denen sich diese Personen bis zur Fremdrettung aufhalten sollen. Bestenfalls sind diese Schutzräume in einer anderen Nutzungseinheit angeordnet und insofern nicht unmittelbar betroffen (z. B.: anderer Brandabschnitt im „gleichen Geschoss“ für Bettenstationen von Krankenhäusern).

Schutzräume innerhalb des unmittelbar betroffenen Gebäudeabschnitts sind beispielsweise von Tunnelanlagen bekannt. Hierfür muss die Schutzwirkung der Schutzräume so ausgelegt werden, dass die zu erwartenden Brandszenarien im betroffenen Bereich schadlos überstanden werden können. Die Fremdrettung aus diesen Schutzräumen ist dann erst nach Beendigung des Brandes ohne unmittelbare Brandeinwirkungen abzuwickeln. Die hierfür erforderlichen Maßnahmen werden dann durch die Feuerwehreinsatzkräfte bereitgestellt (ggf. vom Betreiber der baulichen Anlage vorgehalten).

Als „Temporäre Schutzräume“ werden in Einzelfällen notwendige Treppenräume bzw. deren Vorräume genutzt, insbesondere in Räumungs-Konzepten für gehbehinderte Personen (Rollstuhlfahrer). Treppenräume, die ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen allein nach den Regel der Bauordnungen errichtet werden, können und dürfen verrauchen und sind auch als „temporäre Schutzräume“ nur sehr bedingt geeignet, da hierin die Personen potenziell ebenfalls gefährdet sind.

4.3.7 Bemessungsbrandszenarien für die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

Welche Erwartungen an die Effektivität wirksamer Löschmaßnahmen gestellt werden, wird im Brandschutzkonzept aufgrund der Schutzzielkonkretisierung und Risikobewertung im Einzelfall festgelegt. Wegen der Einsatzgrenzen der Feuerwehr werden daher bei hohen Erwar-

⁵ Mit dem Begriff des „Bewegungsraumes“ soll hier deutlich gemacht werden, dass sich darüber eine Heißgasschicht mit erheblich höheren Temperaturen befinden kann, deren Wärmestrahlung allerdings zu beachten ist.

tung häufig automatische Feuerlöschanlagen eingesetzt. Für eine realitätsnahe Abschätzung dieser Einsatzgrenzen ist es erforderlich, entsprechende Szenarien näher zu untersuchen.

Grundsätzlich erfordern wirksamen Löschmaßnahmen der Feuerwehr ausreichende Bedingungen für einen Innenangriff. Diese Arbeitsbedingungen der Feuerwehr innerhalb des vom Brand betroffenen Raumes entsprechen denen für die Fremdrettung (s. Abschnitt 4.3.5).

Das „credible scenario“ ist in Bereichen mit erwartungsgemäß vorhandenen Zündquellen festzulegen, in denen hohe Brandlastdichten vorhandenen sind (90%-Fraktile bezogen auf den Gebäudeabschnitt). Bei der Auswahl der Brandentstehungsorte ist außerdem die Entzündlichkeit der brennbaren Stoffe sowie deren Abbrandverhalten zu beachten.

4.3.8 Bemessungsbrand-Szenarien für die Bauteil- bzw. Tragwerksbemessung

Bei der Festlegung der maßgeblichen Bauteile für die Brandschutzbemessung ist neben der maßgeblichen Temperaturbeanspruchung auch die Lastausnutzung der Bauteile zu berücksichtigen (Ingenieraufgabe am konkreten Objekt).

Die Bestimmung des Fire-Compartments, d. h. des Brandraumes bzw. des möglichen Bereiches, der in den Brand involviert sein kann (Berücksichtigung brandschutztechnischer Abtrennungen mit definiertem Feuerwiderstand) ist Grundlage für die Brandschutz-Bemessung. Anschließend ist die Bemessungsbrandlast bzw. die Lage der Brandlast im Bereich des zu bemessenden Bauteils festzulegen. Der Brandraum kann durch Wände und Decken (Umfassungsbauteile) begrenzt werden, die einen ausreichenden Feuerwiderstand besitzen.

Die Umfassungsbauteile des Brandraumes müssen eine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen, anderenfalls ist eine Brandausbreitung über den originären Brandraum in der Nutzungseinheit zu betrachten. Die ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit der umfassenden Bauteile kann über das Raumabschlusskriterium gemäß DIN 4102 Teil 2 bzw. das EI-Kriterium nach DIN EN 13501 bewertet werden. Werden die vorgenannten Kriterien eingehalten, kann davon ausgegangen werden, dass sich Brandlasten auf der brandabgekehrten Seite des Umfassungsbauteils aufgrund der Wärmeströmung durch das Bauteil nicht entzünden. Werden die Kriterien nicht eingehalten, so ist im Modell die Brandausbreitung auf der brandabgekehrten Seite von dem Zeitpunkt an zu untersuchen, an dem die Kriterien nicht mehr eingehalten sind. Alternativ kann auf der sicheren Seite liegend von Brandbeginn an das entsprechende Bauteil in der Simulation nicht berücksichtigt werden, wodurch von Brandbeginn an ein größerer originärer Brandraum mit größerer Brandausbreitungsfläche angesetzt werden muss.

Die Berücksichtigung der Brandausbreitung über Öffnungen (z. B. vertikaler Brandüberschlag über Fenster von Geschoss zu Geschoss) ist dabei ggf. gesondert in Abhängigkeit der definierten Schutzziele zu betrachten⁶.

Umfassende Wände mit ausreichender Feuerwiderstandsfähigkeit müssen vom Fußboden bis zur Decke reichen. Decken und Fußböden müssen ebenfalls eine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit besitzen. Ihre Integrität muss über die gesamte Branddauer sichergestellt sein.

⁶ Hinweis: Für die Bewertung des vertikalen Brandüberschlags werden u. a. in [EC1-1-2] Verfahren zur Verfügung gestellt.

Die Höhe des Brandraums entspricht der gemittelten lichten Höhe zwischen Fußboden und Decke. Nichtbrennbare Unterdecken bzw. Doppelböden können bei der Ermittlung der Brandraumhöhe berücksichtigt werden, wenn sie eine ausreichende Feuerwiderstandsdauer aufweisen. Die Grundfläche des Brandraumes ist die Fläche zwischen den Innenseiten der umfassenden Wände. Voll entwickelte Brände in langen, schlauchförmigen Räumen wie z. B. Fluren können mit einem vereinfachten Naturbrandmodell nicht erfasst werden.

Für Bauteile im Deckenbereich wie z. B. Unterzüge ist i. d. R. die Heißgasttemperatur bemessungsmaßgebend. In größeren Räumen ($> 400 \text{ m}^2$) ist die lokale Beanspruchung im Plumebereich zu berücksichtigen. Für Stützen ist in der Brandanfangsphase die PlumeTemperatur bzw. Flamenttemperatur im Bereich des Brandherdes maßgebend. In größeren Räumen ($> 400 \text{ m}^2$) wird die Heißgasttemperatur für die Bemessung von Stützen maßgebend, sobald die Brandlast im Bereich der Stützen abgebrannt ist.

Eine wesentliche Einflussgröße für die Bauteil- und Tragwerksbemessung sind die Ventilationsbedingungen. Für die Ermittlung der maßgeblichen Ventilationsbedingungen sind als mögliche Öffnungen des Brandraumes alle Fenster und Türen des Brandraumes zu berücksichtigen. Ggf. sind im Programmablauf während der Simulation szenariobedingte Veränderungen der Ventilationsbedingungen (z. B. Zerbrechen von Fensteröffnungen) zu berücksichtigen.

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 Zuluftführung führen. Fensterflächen können über den gesamten Brandverlauf als vollständig offen angenommen werden, wenn sie aus Einfach- oder Mehrfachverglasung bestehen (keine G-Verglasung oder F-Verglasung nach DIN 4102). Aus Brandversuchen ist bekannt, dass Fensterglas bei einer Temperatur von ca. 300 °C nach ca. 5 bis 10 Minuten versagt [4.27].

Auslösezeiten von anlagentechnischen Maßnahmen, Eingriffszeiten der Feuerwehr auf den Bemessungsbrand sind nach Kapitel 10 zu bestimmen.

4.3.9 Bemessungsbrandszenarien für Sachwertschutzaufgaben

Die Sachversicherer bewerten den wahrscheinlichen Erreichungsgrad ihrer Schutzinteressen (siehe auch Abschnitt 3.4 mit der beispielhaften Aufführung der Schutzinteressen), indem sie verschiedene Szenarien näher betrachten. Dabei stellen sie insbesondere den jeweiligen Brandgefahren (Brandursachen, Brandentstehungsorte) die vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen gegenüber und betrachten die wahrscheinlichen Brandauswirkungen auf das Gebäude, dessen Inhalt sowie die Betriebsprozesse. Dabei wird weitgehend auf Schadenerfahrungen zurückgegriffen, die auch außergewöhnliche Schaden- bzw. Brandverläufe einschließen.

Erläuternde Hinweise:

In der Praxis werden Maßnahmen zum Sachwertschutz von Versicherern im Zuge einer ganzheitlichen Betrachtung und gemäß den nutzungsspezifischen Schadenerfahrungen, die u. a. aus der Schadenstatistik abzulesen sind und/oder aus einzelnen Großschadeneignissen gewonnen werden, festgelegt. Zu nennen sind u. a.:

- Einführung eines betrieblichen Erlaubnisschein-Verfahrens für feuergefährliche Arbeiten,
- Feuerbeständige Abtrennungen innerhalb eines Brandabschnittes bzw. Komplexes
- Einsatz automatischer Brandmeldeanlagen,
- Vollfläche Installation automatischer Feuerlöschanlagen.

Diesen Festlegungen liegt eine eingehende Analyse von Brand- und Folgenschäden als Szenarien zugrunde - von der Betriebsunterbrechung einschließlich möglicher Rück- und Wechselwirkungen, über Umweltschäden, deren Haftungsrisiken im neuen Umweltschadengesetz konkretisiert werden, bis hin zur unternehmerischen Existenzgefährdung.

Korrespondierend zu den oben genannten Aspekten soll jeweils folgendes Ziel in der Regel zuverlässiger als nach öffentlich-rechtlich Schutzzielkriterien erfüllt werden:

- Vermeidung der Brandentstehung durch feuergefährliche Arbeiten als eine der typischen Brandursachen,
- Minimierung von Gefahren der Betriebsunterbrechung durch
 - den Schutz betriebswichtiger Anlagen und Einrichtung vor einem Brand aus den benachbarten Räumen bzw.
 - Abtrennung betrieblicher Bereiche mit erhöhten Brandgefahren z. B. Gefahrstofflager und damit Begrenzung eines möglichen Brandes auf den Brandentstehungsraum,
- Vermeidung großflächiger Brandausbreitung und damit Schadenbegrenzung durch frühzeitige Branderkennung und Einleitung wirksamer Brandbekämpfung.

Im Bereich der Versicherungswirtschaft werden zur Erfüllung der besonderen Schutzziele insbesondere Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Planung und Ausführung sowie beim Betrieb der Brandschutzanlagentechnik formuliert, um die ständige Funktionsbereitschaft der Schutzmaßnahmen in der Praxis sicherzustellen.

Ergänzend dazu wird die Leistungsfähigkeit örtlicher Feuerwehr in Form einer sogenannten Feuerwehrklasse berücksichtigt. Darin werden u. a. die Alarmierungswege, die tageszeitabhängige Einsatzstärke, verfügbare Ausrüstungen, z. B. Fahrzeuge, Atemschutzgeräte usw., Qualifikation der Einsatzkräfte und Löschwasserversorgung erfasst und bewertet.

Die Grundsätze der ganzheitlichen Betrachtung der Versicherer sind im "Technischer Leitfaden der Feuer- und Feuerbetriebsunterbrechungs-Versicherung; Risiken, Schutzziele, Schutzkonzepte und Schutzmaßnahmen" (VdS 195) eingehend erläutert. Darin wird zudem auf weitere Empfehlungen der Versicherer zur konkreten Bemessung von Brandschutzmaßnahmen Bezug genommen, z. B. VdS CEA 4001: "Sprinkleranlagen, Richtlinien für Planung und Einbau", die auf reale Brand- und Löschversuche basieren.

Für die Bemessung von feuerwiderstandsfähigen Bauteilen gehen die Versicherer übereinstimmend mit den Prüf- und Klassifizierungsnormen stets von einem Vollbrand-

Szenarium als "worst-case" aus. Dabei geht die klassifizierte Feuerwiderstandsdauer der Bauteile als eine maßgebliche Kenngröße des Brandverhaltens und die Brennbarkeit der jeweils im Bauteil verwendeten Baustoffe in die sogenannte Bauartklasse der Versicherer zur vereinfachten Beurteilung von Gebäuden ein. Mit den Bauartklassen werden Gebäude je nach dem Brandverhalten des Trag- und Dachtragwerks, der Geschossdecken sowie Außenwände und Bedachung, unterschiedlich eingestuft. Diese Einteilung als eine Kenngröße der ganzheitlichen Betrachtung spiegelt den Grundgedanken wider, dass

- eine Brandeintragung von Außen über die Außenwände,
- eine ungehinderte und damit großflächige Brandausbreitung im Gebäude sowie
- eine Behinderung wirksamer Brandbekämpfung der Feuerwehr, z. B. auf Grund einer akuten Gefährdung der Einsatzkräfte durch den frühzeitigen Einsturz des Tragwerk,

nach Möglichkeit verhindert werden muss.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass sich die Versicherer als Risikoträger ebenfalls Schadenszenarien bedienen. Ausgehend von dieser Grundüberlegung werden die erforderlichen Maßnahmen jeweils zur Vermeidung und Begrenzung von Schäden im Rahmen eines ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes abgeleitet. Diese stark vereinfachte Vorgehensweise - ohne z. B. rechnerische Ermittlung der Brandlast - hat sich dennoch in der Praxis gut bewährt, da hiermit u. a. sowohl die nutzungsspezifischen als auch die alltagstypischen Gefahren in die ganzheitliche Betrachtung einbezogen werden können. Für die Bemessung von konkreten Brandschutzmaßnahmen, z. B. feuerwiderstandsfähigem Tragwerk oder automatischen Feuerlöschanlagen, greifen die Versicherer stets auf das Vollbrandszenarium als "worst-case" bzw. reale Brand- und Löschversuche zurück.

Typische Brandszenarien, die im Zusammenhang mit dem Sachwertschutz betrachtet werden, sind z. B.

- Brandentstehung durch allgemeine und nutzungsspezifische Ursachen, z. B. mangelhafte Elektroinstallation und Funkenbildungen bei typischen Arbeitsprozessen
- Brandentstehung durch besondere Ursachen, z. B. Brandstiftung, bei der gleichzeitig mehrere Brandentstehungsorte vorhanden sein können
- Gefährdung und Schutz betriebswichtiger Anlagen und Einrichtungen (z. B. EDV-Räume und Steuerungszentrale)
- Rauchausbreitung im Brandfall, die ggf. erhebliche Schäden an den rauchempfindlichen Gebäudeinhalten, z. B. Nahrungsmittel, Textilien, verursachen kann.

4.4 Bemessungsbrände

4.4.1 Der Brandverlauf und Grundsätze seiner Modellierung

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 4.2 dargestellt.

Der Bemessungsbrand ist in der Regel ein theoretischer – aber durchaus möglicher – Brandverlauf, der eine Vielzahl zahlbarer Brandverläufe auf der sicheren Seite erfasst. Der Bemessungsbrand muss nicht zwingend alle 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 Erarbeitung von Brandschutzkonzepten wird von der Annahme ausgegangen, dass der Brand nur an einer Stelle im Gebäude beginnt. Brandübertragungen auf andere Objekte sind zu berücksichtigen.

Die zeitlichen Verläufe für die Entstehungsraten von Energie und Rauchprodukten werden auch als „Quellterm“ bezeichnet.

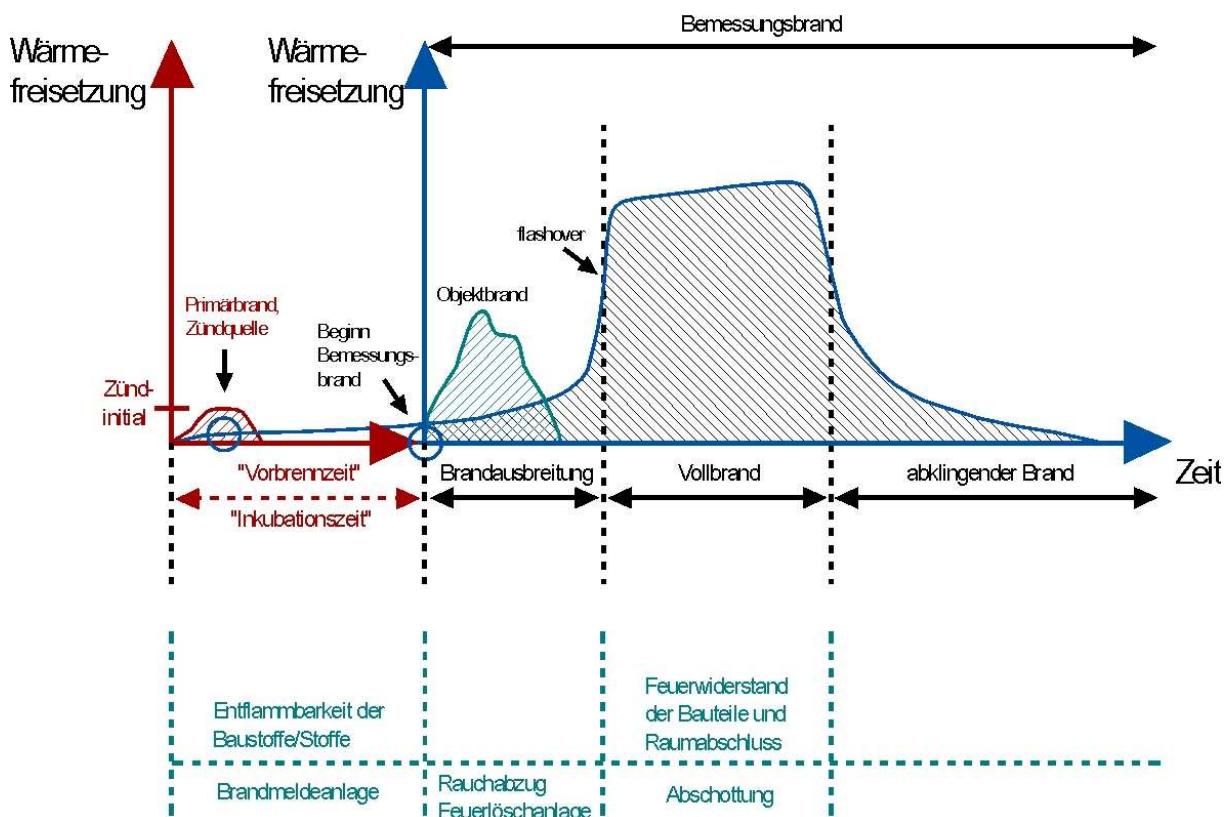


Bild 4.2 Brandentwicklungsphasen beim "natürlichen Brand"

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 (kg),
- mögliche Brandfläche (-ausdehnung),
- Raumgeometrie einschließlich Öffnungen,
- Ventilationsöffnungen, Öffnungswirkung eventuell zeitlich abgestuft,
- Flashover-Bedingungen,
- wärmespezifische Parameter der Bauteile,
- Energieverluste außerhalb des Raumes (Flammen vor den Öffnungen),
- insgesamt freisetzbare Energie.

Der „Bemessungsbrand“ stellt die zeitabhängige Freisetzungsraten von Energie, chemischen Produkten und sichttrübenden Partikeln dar. Wichtige Kenngrößen, die für die Beschreibung des Bemessungsbrandes verwendet werden können, werden in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

In der Regel wird die Brandentwicklung (Wärmefreisetzungsraten, Brandausbreitungsgeschwindigkeit, Ausbeuten, Rauchpotential, etc.) im Sinne des zuvor entwickelten Konzeptes als Bemessungsbrand vorgegeben. Dabei beschreibt der Bemessungsbrand normalerweise eine „ungestörte“ Brandentwicklung, also insbesondere den Brandverlauf bei ausreichender Sauerstoffzufuhr (brandlastgesteuerte Verbrennung). Der ventilationsgesteuerte Abbrand wird von vielen Rechenmodellen unter Beachtung des globalen oder lokalen Sauerstoffangebotes modelliert; bei anderen Verfahren muss dies der Anwender separat überprüfen. Eine entsprechende Abweichung vom quantitativen Verlauf des ursprünglichen Bemessungsbrandes ist zu dokumentieren. Bei einem ventilationsgesteuerten Abbrand können sich die Schadstoffausbeuten und das Rauchpotential ändern⁷.

Bei angenommener Konstanz des unteren Heizwertes über der gesamten Branddauer ist die Massenverlustrate (Abbrandrate) proportional zur Wärmefreisetzungsraten. Da auch - für über die Branddauer konstant angenommene „Yield“- Anteile - die Freisetzungsraten der gebildeten chemischen und der sichttrübenden Produkte proportional mit dem Masseverlust der Brandlast einhergehen, ist zur Festlegung eines Bemessungsbrandes die zeitliche Entwicklung der Wärmefreisetzungsraten zusammen mit der stofflichen Charakterisierung der Brandgüter ausreichend.

Damit kann die Wärmefreisetzungsraten („heat release rate -HRR-“) als zentrale Informationsquelle herangezogen werden. Von der Wärmefreisetzung lässt sich dann im Regelfall die Entstehung weiterer Brandprodukte inklusive Rauchpartikel ableiten.

⁷ Die Angaben zu den Rauchausbeuten im Kapitel 8 beziehen sich auf gut ventilierte Verhältnisse.

Tabelle 4.3 Kenngrößen für die Beschreibung des Bemessungsbrandes

Kenngrößen und Literaturhinweise	Symbole und Einheiten	Bedeutung der Kenngröße
Brandlast	Q [kJ]	Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem bestimmten Bereich frei werden könnte, einschließlich der Bekleidungen von allen angrenzenden Oberflächen.
Wärmefreisetzungsr率	\dot{Q} [kW]	Wärmemenge, 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
Brandbelastung, nach DIN 18230-1 und [4.14]	q bzw. q'' in MJ/m ² bzw. kWh/m ² $3,6 \text{ MJ/m}^2 = 1 \text{ kWh/m}^2$	Rechenwert für die im Brandfall freigesetzte Wärmemenge, bezogen auf die jeweils anzusetzende Bezugsfläche, hat Einfluss auf die Brennzeit und auf die Höhe der Brandraumtemperatur
flächenspezifische Wärmefreisetzungsr率 oder flächenbezogene Brandleistung	\dot{q} bzw. \dot{q}'' [kW/m ²]	Auf eine (in der Regel) horizontale Brandfläche bezogene Brandleistung
unterer Heizwert, nach	H_u in kJ/kg bzw. kWh/kg	Verbrennungswärme bei vollständiger Verbrennung, beschreibt über die flächenspezifische Abbrandrate vorrangig die Wärmefreisetzungsr率
effektiver Heizwert	$H_{\text{eff}} = \chi \cdot H_u$ in [kJ/kg] χ [-] ($\chi \leq 1$)	Produkt aus unterem Heizwert und der Verbrennungseffektivität χ
Brandausbreitungs geschwindigkeit nach [4.26]	v_{aus} in m/min	Kenngröße u.a. für die Berechnung der Brandfläche pro Zeiteinheit

Kenngrößen und Literaturhinweise	Symbole und Einheiten	Bedeutung der Kenngröße
Abbrandrate	\dot{m} in kg/s	Masseverlust des Brandguts durch Verbrennung. Die Abbrandrate ist über den effektiven Heizwert mit der Wärmefreisetzungsr率 verknüpft: $\dot{Q} = \dot{m} \cdot H_{\text{eff}}$
flächenspezifische Abbrandrate nach [4.26]	\dot{m}^* , v_{ab} in kg/(m ² min)	Auch Massenabbrandgeschwindigkeit, ermöglicht die Ermittlung der relativen Wärmefreisetzungsr率 in Verbindung mit H_u
Rauchpartikel-Massenentstehungsanteil (auch Rußausbeute) aus SFPE-Handbuch, [4.3], Ausbeuten	Y in g _{Ruß} /g _{verbrannter Stoff}	Massenanteil der durch Verbrennung frei werdenden Rauchpartikel aus der Brennstoffmasse, typische Ausbeuten mit Relevanz für Nachweisverfahren sind die Rußausbeute $Y_{\text{Ruß}}$ bzw. Y_s sowie die Ausbeuten für Kohlenmonoxid und Kohlendioxid Y_{CO} bzw. Y_{CO_2} .
Rauchpotential [4.3]	D_m in m ² /g	Maß für die sichttrübende Eigenschaft des Brandrauchs (optische Rauchdichte), Wesentlich abhängig von der stofflichen Zusammensetzung des Brandguts und den Ventilationsbedingungen (weitere Details siehe Kapitel 8)
Brandentwicklungs faktor, bzw. „charakteristische Brandentwicklungszeit“	α in kJ/s ³ bzw. t_g in s	Kenngrößen zur Ermittlung der Energiefreisetzung während der Brandentwicklungsphase $\alpha = 1000 \text{ kW}/t_g^2$

In der Brandschutzpraxis werden allerdings auch häufig bestimmte Brandparameter direkt verwendet – beispielsweise die Temperaturrentwicklung im Brandraum (z. B. die ETK) zur Auslegung von baulichen Brandschutzmaßnahmen. Insofern eignen sich die Testbrände von Normprüfverfahren auch für den rechnerischen Nachweis mit Methoden des Brandschutz ingenieurwesens, wenn sie als Eingangswerte für die Festlegung des Brandgeschehens herangezogen werden.

Wichtig ist nun die Auswahl der entscheidenden Brandparameter zur Festlegung und Beurteilung der Schutzziele und der zu untersuchenden Brandentwicklungsphasen. Hierzu sollte eine Einigung aller am Bau beteiligten Stellen herbeigeführt werden. Im Rahmen von Brand simulationen kann die zeitliche Entwicklung wichtiger Brandparameter hinreichend genau

abgeschätzt werden. Üblicherweise ist die zentrale Größe für Brandsimulationen die Wärmefreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit (Wärmefreisetzungsrate).

Die Wärmefreisetzungsrate kann auf unterschiedliche Weise gefunden werden, z. B.:

- a) durch Experimente (ähnliche Brandlast bei ähnlichen Raum- und Ventilationsbedingungen),
- b) durch Berechnungen,
 - Nachbildung der Brandentwicklung und -ausbreitung mit Hilfe eines Verbrennungsmodells - nicht gebräuchlich, weil für breite Anwendungsfälle noch nicht gesichert
 - Berechnung der Brandentwicklung (Brandausbreitung und Feuerübersprünge) durch Berechnung von Erwärmung, Pyrolyse und Zündung weiterer Brandlasten ausgehend von einer kleinen Primärbrandstelle - bedingt möglich
- c) durch Vereinbarung auf der Basis von Schadenauswertungen oder anderer Erkenntnisse,
 - 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_u , \dot{m} , v_{aus}) - bei ausreichendem Datenmaterial wird Gegenrechnen mit verschiedenen Ansätzen empfohlen

Der Abbrand verläuft nach Brandphasen und kann grob in die Brandentwicklungs- und -ausbreitungsphase (bis t_1), die Vollbrandphase (t_1 bis t_2) und den abklingenden Brand (t_2 bis t_3) unterteilt werden. Für rechnerische Brandsimulationen wird der Brandverlauf in der Regel wie in Bild 4.3 dargestellt schematisiert den Berechnungen zu Grunde gelegt, wobei

- \dot{Q}_s Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt t_0 , an dem der Entstehungsbrand vom Schwellbrand in einen sich ausbreitenden Brand übergeht (Beginn Bemessungsbrand, s. Bild 4.2),
- \dot{Q}_0 = 1000 kW,
- t_g Faktor zur Beschreibung der Brandentwicklung; der Zahlenwert entspricht der Branddauer [in s] bis zum Erreichen einer Brandstärke von 1 MW.
- $\dot{Q}_{max,v}$ maximale Wärmefreisetzungsrate des ventilationsgesteuerten Brandes,
- $\dot{Q}_{max,f}$ maximale Wärmefreistezungsrate des brandlastgesteuerten Brandes,
- Q_{1-3} Brandlast (Bestimmtes Integral der Wärmefreistzungsratekurve), die in den einzelnen Brandphasen umgesetzt wird.

Die Größe von \dot{Q}_s hängt vom Zündinitial und vom originär brennenden Objekt ab und kann im Allgemeinen zu $\dot{Q}_s = 25 \text{ kW}$ angesetzt werden (s. Abschnitt 4.4.3).

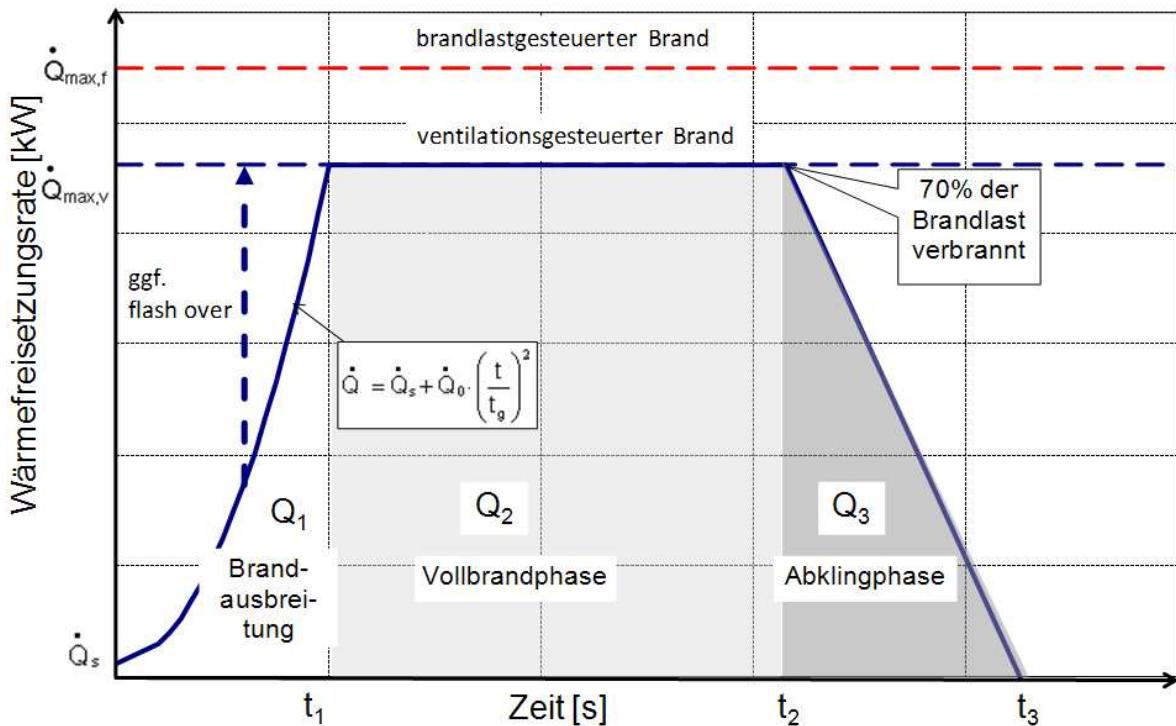


Bild 4.3 Schematisierter Brandverlauf für einen "natürlichen Brand" mit den Brandphasen: Brandausbreitung, Vollbrand und abklingender Brand

Je nachdem, welche Informationen zum konkreten nutzungsbezogenen Beurteilungsszenario vorliegen, werden zur Brandbemessung entweder objektspezifische Beschreibungen oder nach Design-fire-Ansätzen den Brandverlauf charakterisierende oder aus vereinfachten Naturbrandmodellen abgeleitete Ansätze oder auch normative Bemessungsbrände zugrundegelegt. Entsprechend untergliedert wird dies im Folgenden erläutert.

4.4.2 Normative Bemessungsbrände

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

4.4.3 Brandentstehung: Zündenergie und Zündinitial

Die Art und Energie eines Zündinitials⁸ sind bei gegebenen „Brandstoffen“ entscheidend dafür, ob sich ein Brand entwickelt und wie schnell er sich in der Brandentstehungsphase zu

⁸ Das Zündinitial ist ein Gegenstand, der mittels Zündquelle (z. B. Flamme eines Feuerzeuges) entzündet wird, selbst Wärmeenergie freisetzt und diese auf die Brandstoffe im System in der Art einer Zündkette überträgt.

einem sich selbständig ausbreitendem Feuer weiterentwickelt. Die Berücksichtigung der Zündenergie und der Zündinitiale sind besonders wichtig, wenn experimentell gewonnene Erkenntnisse über das Brandverhalten von speziellen Gegenständen verwendet werden sollen.

In der Regel wird das Brandgeschehen in einem Brandraum ab Brandausbreitungsphase betrachtet, bei der der unmittelbare Einfluss der Zündinitiale bereits abgeklungen ist.

Die Bewertung der Zündenergie vorhandener Zündinitiale spielt dagegen eine wesentliche Rolle bei der Auswahl von Brandszenarien und bei der Risikobewertung.

4.4.3.1 Zündquelle und Zündinitial

Als Zündquellen werden Flammen nach DIN 4102, Teil1, (Brennkasten) angesetzt. Zündquelle nach DIN EN ISO 13 943 ist eine Energiequelle, die verwendet wird, um die Verbrennung einzuleiten.

Das Zündinitial wird in der Regel als „ortsfremder Körper“ aufgefasst und stellt die Verbindung zwischen der Zündquelle und den nutzungsspezifischen Brandstoffen her. In Tabelle 4.4 ist eine Auswahl von Zündinitialen mit der Angaben von zeitabhängigen Wärmefreisetzungsraten gegeben.

Tabelle 4.4 Auswahl von Zündinitialen

Zündinitial	Wärmefreisetzungsrate / Zeit Bezug	Quelle
Papierkissen, d. h. Knüllpapier einer Zeitung	10 kW - 1 Minute	DIN E 5510 - 2
Reisegepäck	75 bis 150 kW - 5 Minuten	prEN 45545-2
Papierkorb	30 kW - 15 Minuten	SBI-Gerät nach EN 13 823
Brandflasche, Benzin	ca. 200 kW - 3 Minuten	
Brandschacht	20 kW - 10 Minuten	DIN 4102 - 1

4.4.3.2 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 Wärmefreisetzung 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. [4.28]).

Anhaltswerte können der Fachliteratur entnommen werden; einige Beispiele sind im Anhang zu diesem Kapitel 4 zusammengestellt.

4.4.3.3 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 Versuchsrandsbedingungen, 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 ingenieurmäßige 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.

4.4.3.4 Zündquellen und Zündinitiale

Im Falle des Ansatzes einer objektspezifischen Beschreibung des Bemessungsbrandes wird der Ansatz eines Zündinitials empfohlen, mit dem der Entstehungsbrand eingeleitet werden soll. Beim Aufsetzen des Quellterms des Bemessungsbrandes geht man im Regelfall von einer stabilen Flamme aus. Diesem Ansatz folgen alle (auch normierte) Rechenvorschriften zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsraten oder der Temperatur im Brandraum. Die Zündung über die Schwellbrandphase⁹ ist die Ausnahme, die zu begründen ist. Niedrig energetische Brände sind Flammenbrände. Die Zündung von brennbaren Systemen im Allgemeinen Hochbau oder auch an oder in Fahrzeugen kann durch technische Fehler oder durch die Handlung von Personen¹⁰ erfolgen. Es ist zwischen Zündquelle und Zündinitial zu unterscheiden (s. Abschnitt 4.1.2).

4.4.3.5 Stoffkennwerte der Brandgüter

Die Kenngrößen der im Tabellen-Anhang aufgeführten Kenngrößen werden einzeln oder komplex in die Erstellung des Quellterms einbezogen. Stoffkennwerte sollten in erster Näherung DIN 18230-3 oder [4.13] entnommen werden. Angaben zur stoffspezifischen Rauchproduktionsrate sind in dem SFPE-Handbuch publiziert [4.3]. Ansonsten wird auf den folgenden Abschnitt hingewiesen.

⁹ Verbrennung eines Materials ohne Flamme, auch: Glimmbrand.

¹⁰ Tun oder Unterlassen

4.4.4 „Schwelbrände“ sowie Vorbrennzeit bis zur stetigen Brandausbreitung

Teilweise werden auch kleinere Brände (mit spezifischen Wärmefreisetzung bis etwa zu 25 kW) als „Schwelbrände“ bezeichnet, wenn sie sich weder in ihrer Brandleistung noch in ihrer Brandfläche deutlich vergrößern.

Solche Kleinstbrände lassen sich mit den Methoden des Brandschutzingenieurwesens modellieren und beurteilen. Die von ihnen freigesetzte Rauchmenge ist von der Wärmeleistung des Brandes abhängig. Diese lokal begrenzten Kleinstbrände können etwa den Bränden einzelner Gegenstände mit geringer Wärmefreisetzung nahe kommen (z. B. dem Papierkorb).

In üblichen Brandsimulationen und Brandschutzkonzepten werden die Vorbrennphasen nicht ingenieurmäßig mit Brandsimulationen bewertet. Auf diese Szenarien werden geeignete Brandschutzmaßnahmen ohne genauere Analyse hin festgelegt. Im Rahmen von Brandsimulationen wird die „Vorbrennphase“ nicht näher betrachtet und als „Inkubationszeit der Brandentwicklung“ pauschal berücksichtigt.

Hinweise zur Vorbrennzeit

Insbesondere im Zusammenhang mit der Anordnung von automatischen Brandmeldeanlagen kann die Vorbrennzeit genutzt werden, um wirksame betriebliche und organisatorischen Maßnahmen zu ergreifen (Veranlassung einer Räumung, manuelle Brandbekämpfung durch die Nutzer).

Die Dauer dieser Phase hängt ganz wesentlich von dem Brandverhalten der beteiligten Stoffe ab, was aber zurzeit noch nicht mit den üblichen Mitteln des Brandschutzingenieurwesens hinreichend zuverlässig und genau bestimmbar ist, um die betrieblichen und organisatorischen Maßnahmen als wirksam in Rechnung stellen zu können bzw. festlegen zu können.

4.4.5 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.

4.4.6 Design-Fire-Ansätze für die Brandausbreitungsphase

Als „Startzeitpunkt“ für den Bemessungsbrand gilt i. a. die Existenz einer stabilen Flamme.

Für die Charakterisierung der Brandausbreitung lässt sich die Wärmefreisetzungsraten verwenden, zu der häufig folgende Annahmen getroffen werden:

- für gegebenes Brandgut ist der Abbrand bezogen auf die Grundfläche (Lagerungsfläche) in etwa konstant (zeitlich konstante flächenspezifische Abbrandrate \dot{m}),
- die flächenspezifische Wärmefreisetzungsr率te \dot{q}'' ist in etwa konstant,
- der untere Heizwert H_u bzw. der Bedarf an Verbrennungsluft (als Mittelwert einer eher homogenen Brandlast) ist in etwa konstant,
- die das Brandgut charakterisierende Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} ist über der Zeit in etwa konstant.

Hieraus folgt der Zusammenhang

$$\dot{Q} = H_u \cdot \dot{m}(t) = H_u \cdot \dot{m}'' \cdot A(t) = H_u \cdot \dot{m}'' \cdot \pi \cdot (v_{aus} \cdot t)^2 = \dot{q}'' \cdot \pi \cdot (v_{aus} \cdot t)^2 = \alpha \cdot t^2 \quad (4.1)$$

\dot{Q} (geometrisches Ausbreitungsmodell / Brandfläche $A \Rightarrow t^2$ -Modell)

$$\text{Es gilt die Umrechnung: } v_{aus} = \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{q}'' \cdot \pi}} \quad [\text{m/min}].$$

vergl. auch Abschnitt 4.4.5.2.

welcher bei Kenntnis beispielsweise von α zur Charakterisierung der „Brandentwicklung“ (t^2 -Modell) oder bei Kenntnis von \dot{q}'' und v_{ab} oder von H_u und \dot{m} und v_{ab} (geometrisches Brandmodell, Brandausbreitungsmodell) die jeweilige Wärmefreisetzungsr率te für die Brandentwicklungsphase abzuleiten erlaubt (s. Tabelle 4.3).

Entsprechend gibt es verallgemeinerte Ansätze, die bestimmten, nutzungsbezogenen Brandlasten eine typisierte Brandentwicklung (eine der 4 Klassen: langsam, mittel, schnell und sehr schnell) zuweist. Dabei wird jeweils ein quadratischer Anstieg der Energiefreisetzung über der Zeit ausschließlich durch Angabe von α (Tabelle 4.6) zugeordnet. Auch in normativen Verfahren stecken solche verallgemeinernden Ansätze, wobei mit Blick auf klassifizierte Brandausbreitungsgeschwindigkeiten teilweise – der jeweiligen Nutzung und Normungsziel entsprechend – unterschiedliche flächenspezifische Wärmefreisetzungsr率en zugrunde gelegt sind (Tabelle 4.8).

4.4.6.1 Berechnungen mit dem t^2 -Modell für die Brandausbreitungsphase

Das t^2 -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 (amerikanische) Vorgehensweise Eingang gefunden (siehe Bild 4.3 und Bild 4.4 und Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6):

- 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.
- Die Brandentwicklung wird mit einem sogenannten t^2 -Ansatz beschrieben:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g} \right)^2 \quad (4.3)$$

mit

\dot{Q} Wärmefreisetzungsrates [kW],

\dot{Q}_s Wärmefreisetzungsrates [kW] zum Zeitpunkt t_0 , an dem der Entstehungsbrand vom Objektbrand in einen sich über das Objekt ausbreitenden Brand übergeht (Beginn Bemessungsbrand, s. Bild 4.2),

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

α Steuergröße für die Wärmefreisetzungsrates [kW/s^2]

t Branddauer ohne Berücksichtigung der Zündphase / Schwelbrandphase [s]

t_g Faktor zur Beschreibung der Brandentwicklung; der Zahlenwert entspricht der Branddauer [in s] bis zum Erreichen einer Brandstärke von 1 MW

Diese Brände charakterisieren sich jeweils durch eine konstante spezifische Wärmefreisetzungsrates [kW/m^2] auf die ganze Brandfläche bezogen. Die Brandflächen dieser Kategorie sind in etwa kreisförmig; der Kreisradius wächst linear mit der Zeit. Voraussetzung für die Anwendung der nachfolgenden Tabellen ist eine unbeschränkte Luftzufuhr. Der Parameter α kennzeichnet den Anstieg der Wärmefreisetzung. Ein entsprechende Darstellung der Brandentwicklung für charakteristische Werte der Steuergröße für die Wärmefreisetzungsrates entsprechend Tabelle 4.5 ist in Bild 4.4 gegeben.

Tabelle 4.5 und der Tabellen-Anhang ¹¹ enthalten Empfehlungen für die Einstufung verschiedener Nutzungen und Werte für bestimmte brennbare Materialien.

Aus den Versuchen im Originalmaßstab zur Einstufung von Nutzungseinheiten in Brandentwicklungsklassen 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.

¹¹ Die Tabellenwerte sind als Richtwerte zu verstehen und nicht als normative Vorgaben.

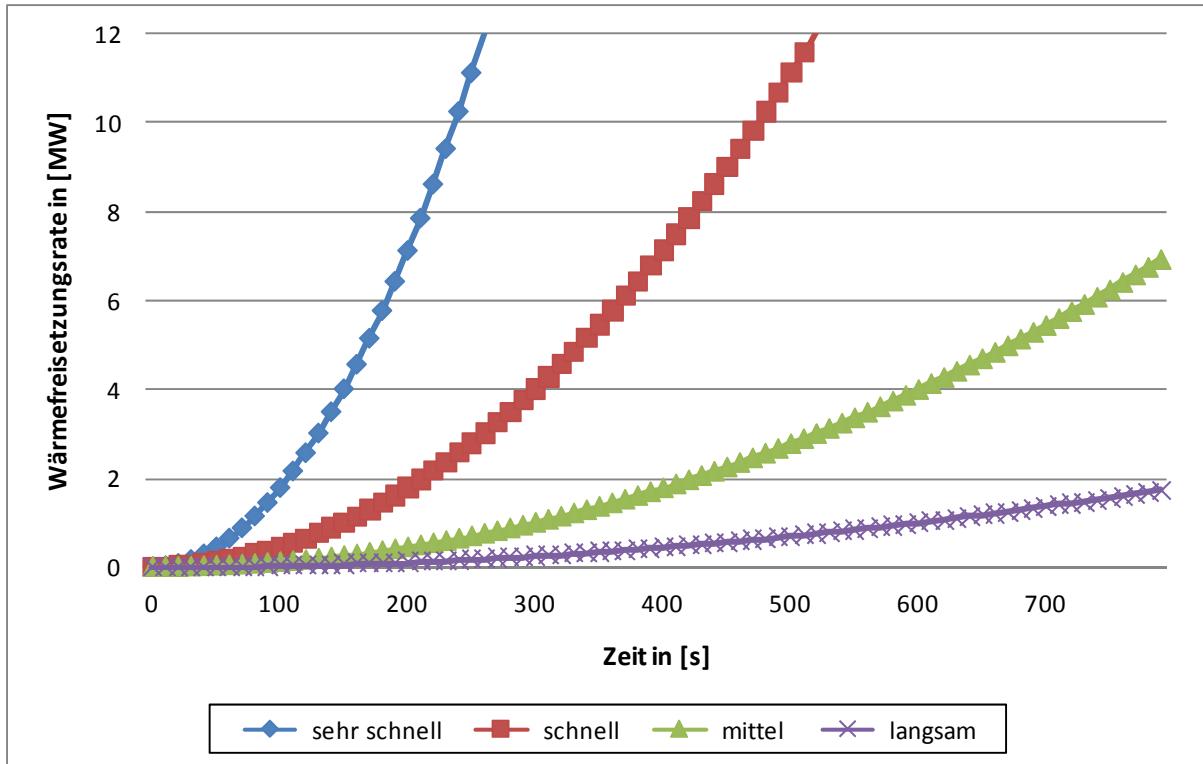


Bild 4.4 Brandentwicklung bis zum Erreichen einer maximalen Wärmefreisetzung

Die Berechnung nach ISO 13 387 muss über festzulegenden Randbedingungen, z. B.

- Erreichen der Brandfläche,
- Eintritt des Vollbrandes,
- Erreichen der für den Raum maximal möglichen Wärmefreisetzung,
- Abbrand von 15 bis 25 % der gesamten Brandstoffmasse oder
- Einsatz der Brandbekämpfung,

kontrolliert und in die Horizontale überführt werden.

Bei den Berechnungen der Wärmefreisetzungsraten nach der t^2 -Beziehung oder über die flächenbezogene Wärmefreisetzungsraten gehen die Brandstoffe nicht direkt in die Berechnungen ein. Deswegen müssen zusätzlich Vereinbarungen zu den Rauchpotentialen getroffen werden, die als Eingabegrößen für die Brandsimulationsmodelle bereitgestellt werden müssen, wenn der Rauchschutz Zielgröße der Berechnung ist.

4.4.6.2 Berechnungen mit dem geometrischen Brandausbreitungsmodell

Mit dem geometrischen Brandmodell wird in einem ersten Schritt die Entwicklung der Brandfläche in Abhängigkeit von der Zeit und danach unter Verwendung von

- flächenbezogenen Brandleistungen (s. Tabellen-Anhang),
- stoffbezogenen Massenabbrandgeschwindigkeiten und Heizwerten

die Brandverlaufskurve bestimmt.

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

Bei genauerer Kenntnis der Brandentwicklung kann bezogen auf die jeweilige Geometrie und die Lage der Zündstelle das von IWANNIKOW [4.26] publizierte Gleichungssystem verwendet werden.

Tabelle 4.5 Zuordnung der Brandentwicklung zu unterschiedlichen Nutzungsarten und Stoffgruppen

Brandentwicklung	Nutzungsart [4.21]	Stoffgruppen [4.35, 4.36]
langsam	Gemäldegalerie	dicht gepackte Holzwaren
mittel	Wohnung, Büro, Hotel (Rezeption, Zimmer), jegliche Nutzung ohne leichtbrennbare Stoffe [4.4]	Baumwolle / Polyester Federkernmatratze, massive Holzmöbel (z. B. Schreibtisch), einzelne Möbelstücke mit geringer Menge an Kunststoffen
schnell	Laden	(hoch) gestapelte Holzpaletten, gefüllte Postsäcke, Kartone auf Paletten, einige Polstermöbel, Kunststoffschaum
sehr schnell	Industrielager, Fertigungs-halle	(schnellbrennende) Polstermöbel, hoch gestapelte Kunststoffe, dünne Holzmöbel (z. B. Kleiderschrank), leichte Gardinen, Pool-Feuer

Tabelle 4.6 Standardwerte für α und t_g (nach NFPA 92 B)

Brand-entwicklung	Parameter α [kW/s ²]	t_g [s] Branddauer bis zum Erreichen von $\dot{Q} = 1$ MW	v_{aus} [cm/min] [4.13, 4.16]
langsam	0,002931	600	6 - 12
			20 - 30
mittel	0,011720	300	35 - 50
schnell	0,046890	150	70 - 120
sehr schnell	0,187600	75	180 - 300

Diese Gleichungen gelten für vertikal und horizontal angeordnete Flächen mit einer Höhe der Brandstoffe von maximal 1,5 m (Möbel in Räumen bis ca. 1,8 m). Bei der vertikalen Brandausbreitung ist v_{aus} zu erhöhen. Bei einseitiger Brandausbreitung in Bild 4.5 c wird der Faktor 2 weggelassen.

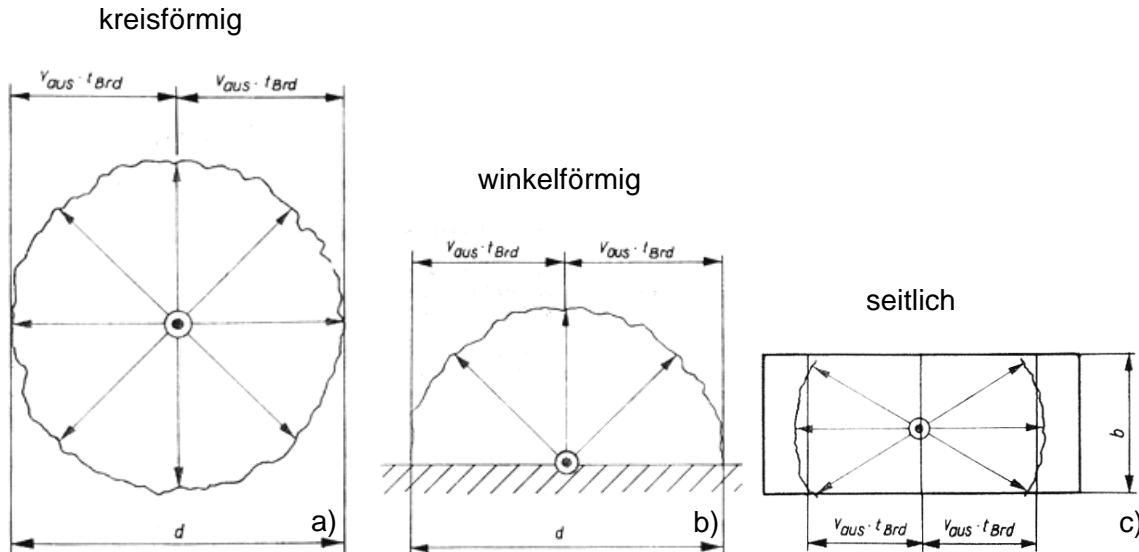


Bild 4.5 (a bis c) Ermittlung der Brandfläche über die Geometrie der Brandausbreitung ¹²

$$A_{Kreis} = \pi \cdot v_{aus}^2 \cdot t^2 \quad \text{kreisförmig} \quad (4.4)$$

$$A_{Brand} = 3,14 \cdot v_{aus}^2 \cdot t^2 \cdot \frac{wi}{360} \quad \text{winkelförmig} \quad (4.5)$$

$$A_{seitlich} = 2 \cdot v_{aus} \cdot t \cdot b \quad \text{seitlich} \quad (4.6)$$

mit

v_{aus} gleichmäßige Brandausbreitung in m/min; vgl. Tabelle 4.7

t Zeit in Minuten

wi Winkel der Brandausbreitung in Grad

Es sind drei Brandausbreitungsgeschwindigkeiten definiert, die - wenn man nach den in der Norm publizierten Werten rechnet, in 5 Minuten-Intervallen zu Brandflächen führen, auf denen eine flächenspezifische Wärmefreisetzung von 300 bzw. 600 kW/m² wirksam wird. (pro Bemessungsgruppe = Brandfläche: 5 Minuten in den Abstufungen 5, 10, 20, 40 und 80 m², bezogen auf 5 bis 25 Minuten.)

¹² Bei der Berechnung nach den Gleichungen lt. Abb. 4.6 ist die Bezugsgröße die Grundfläche. Die mitbrennenden Seitenflächen sind in der Grenzhöhe von 1,5 bis 1,8 m mit abgedeckt. Gleicher gilt übrigens auch für die Grundflächen nach DIN 18232-2 und DIN 18230-3.

Tabelle 4.7 Angaben zur rechnerischen Brandausbreitungsgeschwindigkeit

„klassifizierte“, normierte Brandausbreitungsgeschwindigkeit	Wert [m/min]	Quelle
DIN 18232-2 langsame Brandentwicklung	0,15	DIN 18232-2
DIN 18232-2 mittlere Brandentwicklung	0,25	
DIN 18232-2 schnelle Brandentwicklung	0,45	
DIN 18230-1	1,0	[4.13]
DIN EN 1991-1-2, Anhang E langsame Brandentwicklung	0,2 - 0,3	[4.13], [4.27]
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	[4.13]
DIN EN 1991-1-2, Anhang E Flashover	4,8 - 7,2	

Angaben zur Brandausbreitungsgeschwindigkeit können [4.13] und [4.26] entnommen werden.

4.4.6.3 Normativ festgelegte Bemessungsbrände für die Brandausbreitungsphase

Normativ festgelegte Bemessungsbrände für die Brandausbreitungsphase sind insbesondere aus dem internationalen Bereich bekannt, wo sie zur Auslegung von beispielsweise Rauchabzugsanlagen zur Sicherung der Fluchtwege während der Selbstrettungsphase verwendet werden (Tabelle 4.8).

4.4.7 Flashover

Der Brandverlauf kann plötzlich von der Brandausbreitungsphase in die Vollbrandphase übergehen, wenn sogenannte „Flashover-Kriterien“ erfüllt sind; dann entstehen und entzünden sich Pyrolysegase quasi im gesamten Brandraum und führen zu einem Vollbrand.

Die wichtigsten Flashover-Kriterien sind

- die Flashover-Temperatur in der Heißgasschicht und
- die Flammenstrahlung und/oder die Wärmestrahlung aus der Heißgasschicht
- die Flashover-Zeit
- Flashover-Energie

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Tabelle 4.8 Kennwerte, die Normen zugrunde liegen

Material bzw. Nutzung	Hinweise / Bedingungen	Brandlast MJ/m ²	Heizwert MJ/kg	$\dot{q} = f(A)$ kW/m ²	v_{aus} m/min	v_{ab} kg/(m ² min)	Quelle
DIN 18232-2 bzw. -5	Regelfall	keine begrenzenden Angaben	22,0	300	0,15 - 0,45	0,81	[4.13]
	für schnelle Brandausbreitung und hohe Lagerung		22,0	600		1,6	[4.13]

4.4.7.1 Flashover-Temperatur

Es wird angenommen, dass ein Flashover in Räumen auftritt, wenn die Temperatur der Heißgasschicht etwa 500 - 600 °C beträgt. Unter Berücksichtigung von Gegebenheiten des Brandraumes wird in [4.33] (Methode nach McCaffrey, Quintiere und Harkleroad) eine auf die Kubatur des Objektes bezogene Bedingung formuliert, mit der die Temperaturerhöhung im Falle eines Flashover bestimmt werden kann:

$$\Delta T_{fo} = 6,85 \cdot \left(\frac{\dot{Q}_{fo}^2}{\alpha \cdot A_o \cdot A_R \cdot \sqrt{h_o}} \right)^{1/3} \quad [\text{°C}] \quad (4.7a)$$

mit

\dot{Q}_{fo} Wärmefreisetzungsraten [kW]

α Wärmeübergangskoeffizient [kW/(m²K)]

A_o Öffnungsfläche [m²]

A_R Rauminnenflächen [m²]

h_o Höhe der Öffnung [m]

Ein stationärer Wert für den Wärmeübergangskoeffizient kann für den Fall das die Branddauer t größer als die thermische Einwirkungszeit t_p ist durch

$$\alpha = \lambda / d \quad \text{für } t > t_p \quad (4.7b)$$

bestimmt werden [4.20]. Die thermische Einwirkungszeit ist definiert als

$$t_p = \left(\frac{\rho c_p}{\lambda} \right) \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad \text{für } t \leq t_p \quad (4.7c)$$

mit

ρ Dichte der Oberfläche des Raumes [kg/ m³]

λ Wärmeleitfähigkeit der Oberfläche des Raumes [W/(m K)]

c_p	spezifische Wärmekapazität der Oberfläche des Raumes [kJ/(kg K)]
d	Dicke der Oberfläche des Brandraums [m]
t	Brandauer [s]
t_p	thermische Einwirkzeit [s]

Wenn die Branddauer kleiner als die thermische Einwirkzeit ist, kann ein (instationärer) Wärmeübergangskoeffizient durch folgende Approximation beschrieben werden:

$$\alpha = \left(\frac{\lambda p c_p}{t} \right)^{1/2} \quad \text{für } t \leq t_p \quad (4.7d)$$

Wenn verschiedene Wandmaterialien in einem Brandraum vorliegen sollte ein flächengemittelter Wert für α gewählt werden [4.20].

4.4.7.2 Wärmestrahlung aus der Heißgasschicht

Der thermische Impuls zur Zündung von Brandstoffen geht von der Flamme oder von Heißgasen aus. Die kritische Wärmestromdichte ist ein stoffbezogener Energiebeitrag, der für die Entzündung eines Stoffes aufgewendet werden muss. Beide Größen haben die Dimension [kW/m²].

Wenn der thermische Impuls ca. 10 bis 15 % über der kritischen Wärmestromdichte liegt, erfolgt die Zündung an den betroffenen Materialien.

$$\dot{q}_{\text{Flamme}} = 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad [\text{kW / m}^2] \quad (4.7e)$$

mit

ε Emissionsgrad [-]

T Flammentemperatur [K]

Angaben zum Emissionsgrad ε können dem VDI-Wärmeatlas [4.31] entnommen werden. Neben der Wärmeübertragung durch Strahlung der Flamme muss auch die Wärmeübertragung durch Konvektion berücksichtigt werden. Hierzu sind die Angaben aus [4.31] zu berücksichtigen.

Für überwiegend zelluloseartige Brandstoffe wird in [4.34] für die Bestimmung der kritischen Wärmestromdichte eine zeitabhängige Angabe gemacht:

$$\dot{q}_{\text{krit}} = 65 \cdot t^{-0,23} \quad [\text{kW / m}^2] \quad (4.7f)$$

mit

t Zeit [s]

Betrachtungen zu diesen Größen sind in Ausnahmefällen erforderlich, wenn über eine anfangs aktive Brandquelle zunächst inaktive Brandquellen gezündet werden (Brandausbreitung durch Weiterleitung von einem brennbaren Gegenstand auf einen anderen).

4.4.7.3 Flashover-Zeit

Wird die Brandentwicklung mit einem sogenannten t^2 -Ansatz beschrieben kann die Flashover-Zeit entsprechend der später beschriebenen Gleichung 4.27 berechnet werden.

4.4.7.4 Flashover-Energie

Wird ein Anstieg der Heißgastemperatur um 500 °C als Flashover-Kriterium angenommen, kann Gleichung 4.7g genutzt werden um die Energie zu berechnen, die notwendig ist um einen Flashover hervorzurufen:

$$Q_{fo} = 610 \cdot (\alpha \cdot A_O \cdot A_R \cdot \sqrt{h_O})^{1/2} \quad [\text{kW}] \quad (4.7g)$$

mit den Symbolen von Gleichung 4.7a.

Ergänzend zu dieser Vorgehensweise der Berechnung der Flashoverenergie wird in Kapitel 4.4.7.3.3 mit Gleichung 4.28 eine alternative Berechnungsmethode genannt (Methode nach Thomas). Zur Abschätzung der Flashoverenergie sollten beide Formeln herangezogen werden und der kleinere Wert für die Bewertung eines Brandszenarios herangezogen werden. Mehr Details zu diesen Gleichungen findet man bei Walton und Thomas [4.20].

4.4.8 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.

Es lassen sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Brandszenarien unterscheiden:

- a) Durch Begrenzung aktivierbarer Brandlasten wird selbst wenn alle brennbaren Stoffe in das Brandgeschehen eingebunden sind die Brandleistung limitiert (brandlastgesteuerte Brände).
- b) 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 (ventilationsgesteuerte Brände).

4.4.8.1 Brandlastgesteuerter Brand

In [4.16] wird zur Bestimmung der Wärmefreisetzung in Büro- und Wohnräumen der Zusammenhang vorgeschlagen:

$$\dot{Q}_{max;B} = 0,25 \cdot A_{Brand} \cdot 1000 \quad [\text{kW}] \quad (4.8)$$

Diese Gleichung wurde an Hand von Realbrandversuchen überprüft; sie kann auf Brandflächen von bis zu 200 m² bestätigt werden (siehe auch Kapitel 4.4.7.3.2).

Für die Bestimmung der maximalen Wärmefreisetzungsrate beliebiger Nutzungen kann Gleichung (4.12) angewendet werden.

4.4.8.2 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. Die Öffnungsgröße und die Höhe der Öffnungen eines Raumes geben Aufschluss über die maximal mögliche Wärmefreisetzungsr率e, die in dem betreffenden Raum erreicht werden kann.

Als Anhaltswert für Räume bis zu etwa 100 m² Grundfläche kann für die maximale Wärmefreisetzung im Raum folgende Beziehung herangezogen werden:

$$\dot{Q}_{\max,v} = 0,1 \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_o \cdot \sqrt{h_o} \quad [\text{kW}] \quad (4.9)$$

Symbole

$\max \dot{Q}_{\text{vent}}$	Wärmefreisetzungsr率e, bei der ein Flashover eintritt [kW]
A_o	Fläche der Öffnungen als Zuluftöffnungen [m ²]
h_o	Höhe der Öffnungen als Zuluftöffnungen [m]
H_u	unterer Heizwert der brennbaren Stoffe [kJ/kg]
χ	Verbrennungseffektivität; 0,7

4.4.8.3 Normative Bemessungsbrände für die Vollbrandphase

Die Einheitstemperaturzeitkurve - ETK - wird unmittelbar als Brandraum-Temperaturkurve zur Bauteilbemessung verwendet; sie wird im Vergleich zu verschiedenen natürlichen Brandentwicklungen mit unterschiedlichen Brandbelastungen und Ventilationsverhältnissen in Bild 4.6 grafisch dargestellt.

Sie ist über folgende Formel definiert:

$$T - T_0 = 345 \cdot \lg(8 \cdot t + 1) \quad (4.10)$$

Symbole

T	Brandraumtemperatur [K]
T_0	Temperatur der Probekörper bei Versuchsbeginn [K]
t	Zeit in Minuten

4.4.8.4 Vereinfachte Naturbrandmodelle für die Vollbrandphase

Mit vereinfachten Naturbrandmodellen kann durch eine leistungsabhängige Festlegung der physikalisch bedingten Einwirkungen eine brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken für „natürliche Brände“ mit Hilfe einer einfachen Handrechnung bzw. Tabellenkalkulation durchgeführt werden ohne auf die Anwendung von Wärmebilanz- oder Feldmodelle angewiesen zu sein.

Für „kleine“ bis „mittelgroße“ Brandräume mit einer Fläche von max. 400 m² und einer Höhe von bis zu 6 m sowie Brandlastdichten von max. 1300 MJ/m² kann das in [4.16], [4.17] und [4.19] veröffentlichte Verfahren angewendet werden.

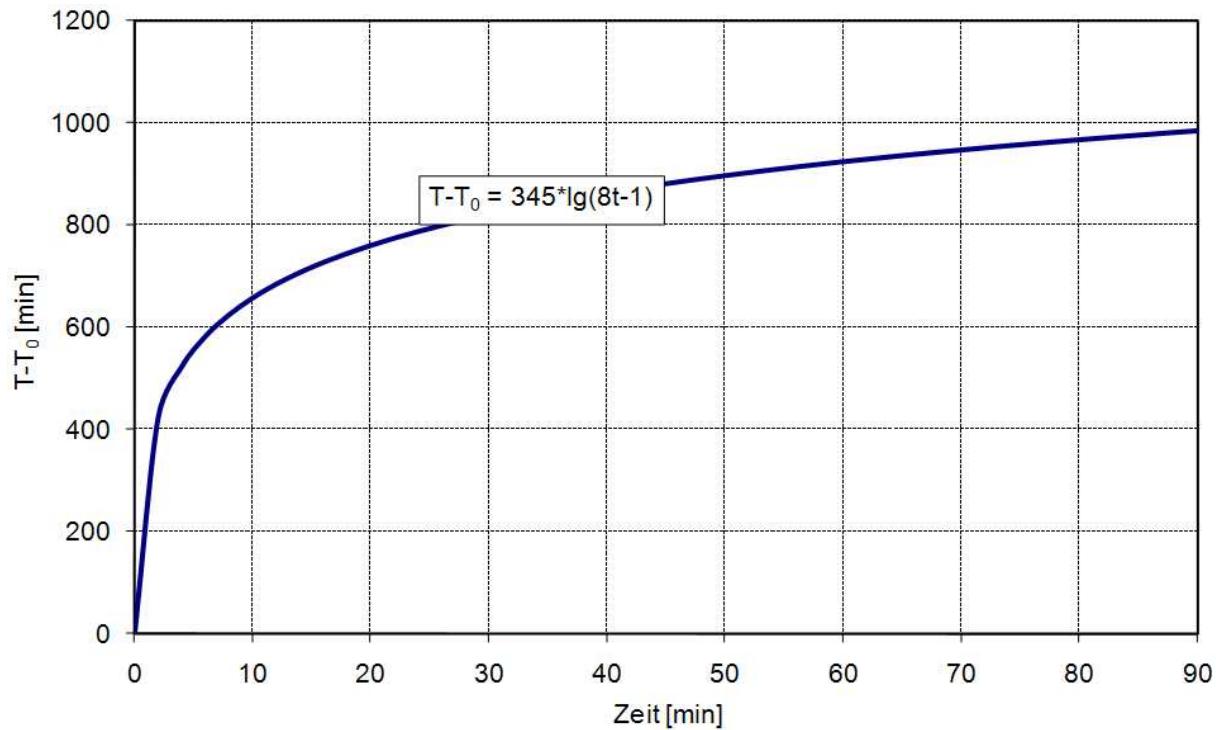


Bild 4.6 Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102-2

Die maximale Wärmefreisetzungsrates für ventilationsgesteuerte Brände beliebiger Nutzungen kann nach Gleichung (4.9) ermittelt werden. Für brandlastgesteuerte Brände beliebiger Nutzung errechnet sich die maximale Wärmefreisetzungsrates nach Gleichung (4.8).

Für Wohn- und Büronutzungen kann die maximale Wärmefreisetzungsrates für ventilationsgesteuerte Brände nach [4.16] vereinfacht nach Gleichung (4.9) bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{\max,v} = 1,21 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad [\text{MW}] \quad (4.11)$$

mit:

A_w Fläche der Ventilationsöffnungen [m^2]

h_w gemittelte Höhe der Ventilationsöffnungen [m]

Die maximale Wärmefreisetzungsrates für brandlastgesteuerte Brände beliebiger Nutzungen kann nach Gleichung (4.12) bestimmt werden zu [4.16]:

$$\dot{Q}_{\max,f} = \dot{m} \cdot A_{fi} \cdot \chi \cdot H_u, \quad (4.12)$$

mit:

\dot{m} flächenspezifische Abbrandrate [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],

A_{fi} max. Brandfläche (i. A. Fläche des Brandraums) [m^2],

H_u unterer Heizwert der brennbaren Stoffe [kJ/kg],

χ Verbrennungseffektivität [-].

Für brandlastgesteuerte Brände mit vorwiegend holzartigen Brandlasten wie z. B. in Wohn- und Büronutzungen kann die maximale Wärmefreisetzungsr率e brandlastgesteuerter Brände nach Gleichung (4.13) ermittelt werden [4.16]:

$$\dot{Q}_{\max,f} = 0,25 \cdot A_f \quad [\text{MW}] \quad (4.13)$$

mit:

$$A_f \quad \text{maximale Brandfläche} \quad [\text{m}^2]$$

Die maximale Wärmefreisetzungsr率e kann als der kleinere der beiden Maximalwerte des ventilationsgesteuerten bzw. brandlastgesteuerten Falls (Gleichung (4.11) bzw. (4.13)) bestimmt werden [4.15]:

$$\dot{Q}_{\max} = \text{MIN}\left\{ \dot{Q}_{\max,v}; \dot{Q}_{\max,f} \right\}. \quad (4.14)$$

Mit Hilfe von Gleichung (4.14) lässt sich somit feststellen, ob der Brand ventilations- oder brandlastgesteuert ist.

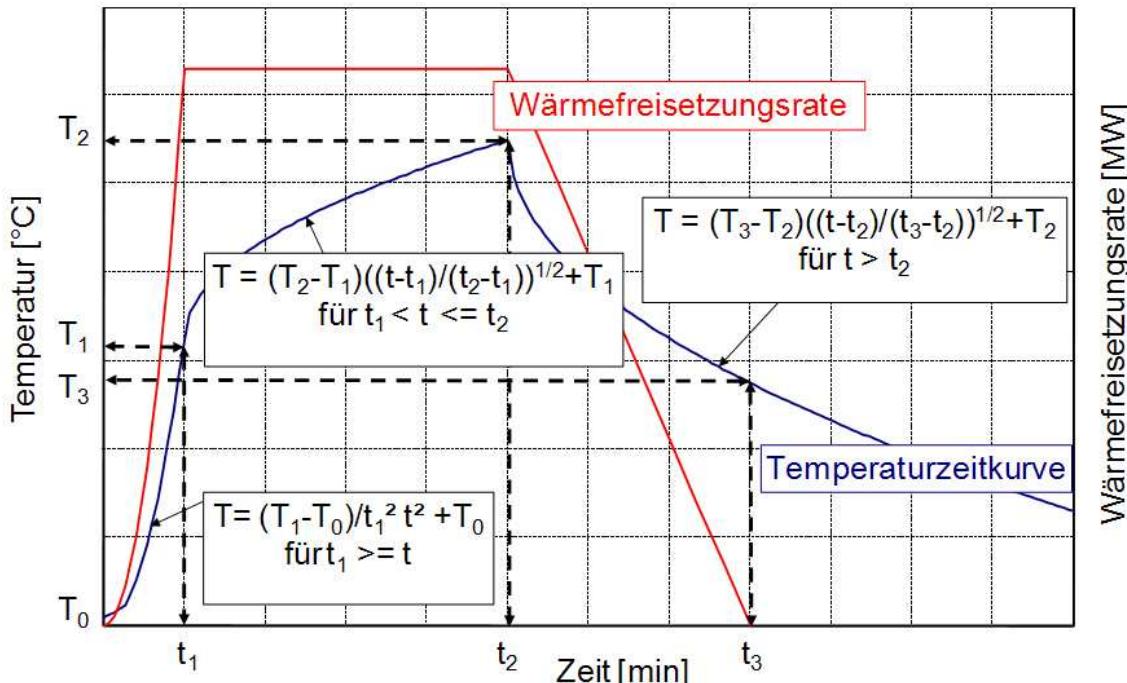


Bild 4.7 Verlauf von Wärmefreisetzungsr率e und Temperaturzeitkurve nach dem vereinfachten Naturbrandmodell der iBMB Parametrischen Brandkurven [4.19]

Im Bild 4.7 ist die standardisierte Brandverlaufskurve 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.

Bei ventilationsgesteuerten Bränden ergibt sich für eine Referenzbrandlastdichte von $q = 1300 \text{ MJ/m}^2$ [4.17]:

$$T_{1,v} = -8,75 \cdot 1/O - 0,1 \cdot b + 1175 \quad [\text{°C}] \quad (4.15)$$

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

$$T_{2,v} = (0,004 \cdot b - 17) \cdot 1/O - 0,4 \cdot b + 2175 \text{ [°C]} \leq 1340 \text{ °C} \quad (4.16)$$

$$T_{3,v} = -5,0 \cdot 1/O - 0,16 \cdot b + 1060 \text{ [°C]} \quad (4.17)$$

wobei:

b gemittelte thermische Eindringzahl der Umfassungsbauteile $J/(m^2 \cdot \sqrt{s} \cdot K)$

$O = A_w \sqrt{h_w} / A_t$ Öffnungsfaktor [$m^{1/2}$]

A_w Fläche der Ventilationsöffnungen [m^2]

h_w gemittelte Höhe der Ventilationsöffnungen [m],

A_t Gesamtfläche der umfassenden Bauteile mit Öffnungsflächen [m^2]

Bei brandlastgesteuerten Brände ergibt sich für die Referenzbrandlastdichte von $q = 1300 \text{ MJ/m}^2$ [4.17]:

$$T_{1,f} = 24000 \cdot k + 20 \text{ [°C] für } k \leq 0,04 \text{ und } T_{1,f} = 980 \text{ °C für } k > 0,04 \quad (4.18)$$

$$T_{2,f} = 33000 \cdot k + 20 \text{ [°C] für } k \leq 0,04 \text{ und } T_{2,f} = 1340 \text{ °C für } k > 0,04 \quad (4.19)$$

$$T_{3,f} = 16000 \cdot k + 20 \text{ [°C] für } k \leq 0,04 \text{ und } T_{3,f} = 660 \text{ °C für } k > 0,04 \quad (4.20)$$

mit:

$$k = \left(\frac{\dot{Q}_{\max}^2}{A_w \cdot \sqrt{h_w} \cdot A_t \cdot b} \right)^{1/3} \quad (4.21)$$

wobei:

\dot{Q}_{\max} maximale Wärmefreisetzungsrates [MW]

A_t Gesamtfläche der umfassenden Bauteile ohne Öffnungsflächen [m^2]

Ausgehend von der Temperaturzeitkurve für die Referenzbrandlastdichte ($q = 1300 \text{ MJ/m}^2$) lassen sich Temperaturzeitkurven für beliebige Brandlastdichten $q_x \leq 1300 \text{ MJ/m}^2$ ermitteln. Der ansteigende Ast der Temperaturzeitkurve bis zum Erreichen der Maximaltemperatur ist unabhängig von der Brandlastdichte. Der Zeitpunkt $t_{2,x}$, bei dem die Maximaltemperatur $T_{2,x}$ erreicht wird, ist brandlastabhängig. Er lässt sich direkt aus dem Ansatz für die Wärmefreisetzungsrates bestimmen. Für $Q_1 < 0,7 Q_x$ ergibt sich [4.17]:

$$t_{2,x} = t_1 + \frac{(0,7 \cdot Q_x) - (t_1^3 / (3 \cdot t_g^2))}{\dot{Q}_{\max}} \quad (4.22)$$

mit:

t_g Faktor zur Beschreibung der Brandentwicklung entsprechend Gleichung (4.4). Für Wohn- und Büronutzungen kann der Faktor zu $t_g = 300 \text{ s}$ gesetzt werden.

Die zugehörige Temperatur $T_{2,x}$ ermittelt sich zu:

$$T_{2,x} = (T_2 - T_1) \cdot \sqrt{(t_{2,x} - t_1)/(t_2 - t_1)} + T_1. \quad (4.23)$$

Die Temperaturen $T_{3,x}$ zum Zeitpunkt $t_{3,x}$ liegen für unterschiedliche Brandlastdichten q_x auf einer logarithmischen Funktion durch $(t = 0; T_0)$ und $(t_3; T_3)$:

$$T_{3,x} = (T_3 / \log_{10}(t_3 + 1)) \cdot \log_{10}(t_{3,x} + 1), \quad (4.24)$$

wobei

$$t_{3,x} = t_{2,x} + \frac{0,6 \cdot Q_x}{Q_{\max}}. \quad (4.25)$$

Der abfallende Ast wird für $q_x < 1300 \text{ MJ/m}^2$ durch Gleichung (4.26) beschrieben:

$$T = (T_{3,x} - T_{2,x}) \cdot \sqrt{(t - t_{2,x})/(t_{3,x} - t_{2,x})} + T_{2,x}. \quad (4.26)$$

Der Zeitpunkt eines ggf. auftretenden Flashover $t_{1,fo}$, bei dem die Wärmefreisetzungsrat schlagartig auf ihr Maximum ansteigt, kann mit Gleichung (4.27) ermittelt werden:

$$t_{1,fo} = \sqrt{t_g^2 \cdot \dot{Q}_{fo}}, \quad (4.27)$$

wobei \dot{Q}_{fo} nach der Methode von Thomas [4.20] bestimmt werden kann:

$$\dot{Q}_{fo} = 0,0078 \cdot A_T + 0,378 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad [\text{MW}] \quad (4.28)$$

Bild 4.8 zeigt schematisch den Ablauf zur Bestimmung des Temperaturzeitverlaufs für Wohn- und Büronutzung in einem Flussdiagramm. In [4.18] wird die Anwendung des Verfahrens für Raumzellenbrände beschrieben und beispielhaft dargestellt, mit dem die sukzessive Brandausbreitung von Raumzelle zu Raumzelle vereinfacht berücksichtigt werden kann.

4.4.9 Abklingphase

Die Abklingphase beginnt in der Regel etwa nachdem ca. 70 bis 85 % der insgesamt auf der Brandfläche freisetzbaren Energie umgesetzt worden sind. Dann fällt die Wärmefreisetzungsrate sehr rasch ab und kann näherungsweise sowohl linear als auch mit einer Exponentialkurve (Gl. 4.29) abgebildet werden.

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{\dot{Q}_{\max}}{Q_{\text{ges,Rest}}} \cdot (t - t_{\text{Abkling}})\right)} \quad (4.29)$$

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

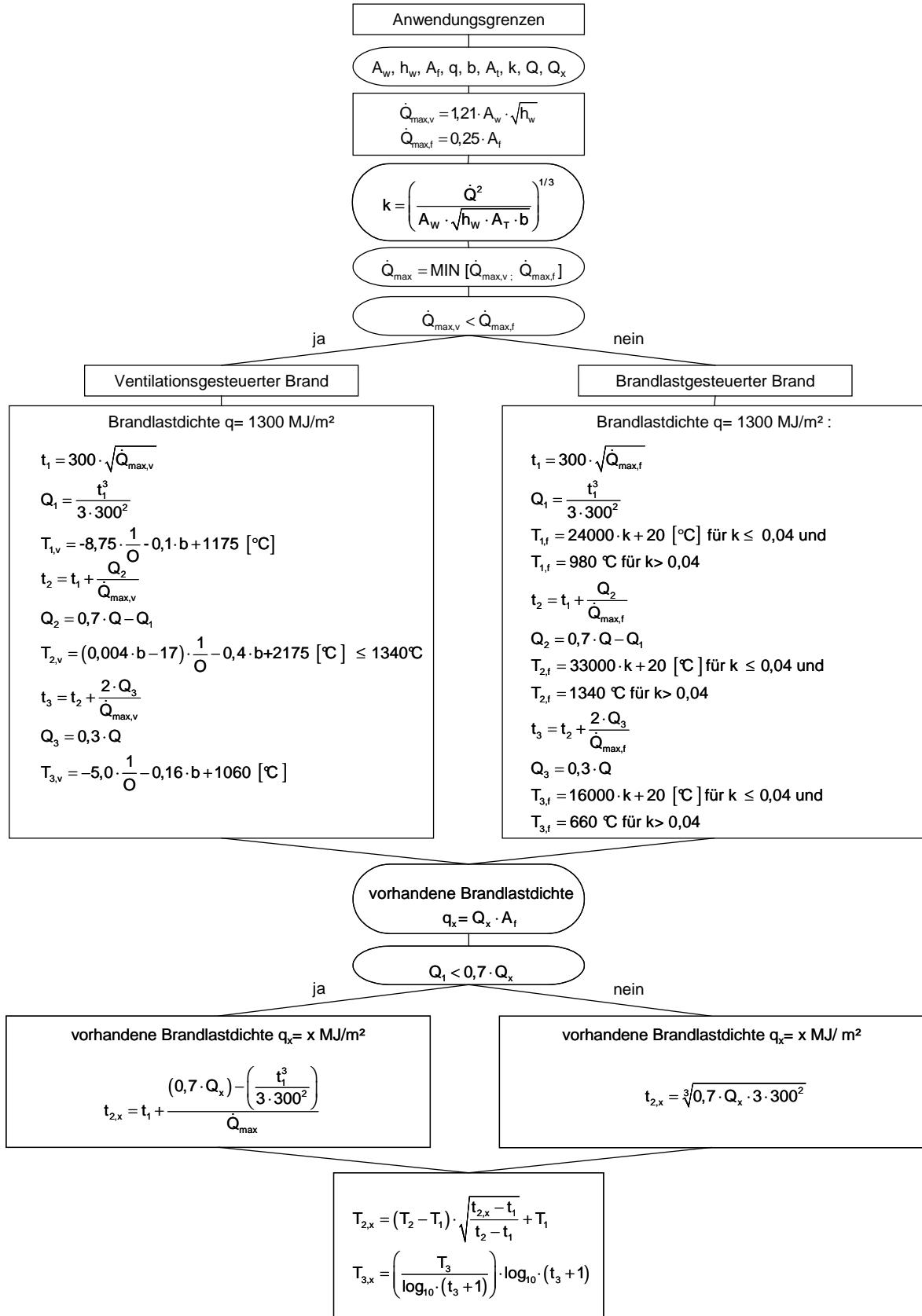


Bild 4.8 Schematischer Ablauf zur Bestimmung des Temperaturzeitverlaufs eines natürlichen Brandes in Wohn- und Büronutzungen ($t_g = 300 \text{ s}$) mit den iBMB Parametrischen Brandkurven [4.17], [4.19]

4.4.10 Berücksichtigung von Löschmaßnahmen

4.4.10.1 Löschmaßnahmen generell

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 Wärmefreisetzung in einem sprinklergeschützten Raum eingeschränkt wird. Je nach dem Auslösezeitpunkt und nach der abschätzbaren Effektivität der Löschmaßnahme können sich unterschiedliche Brandentwicklungen einstellen.

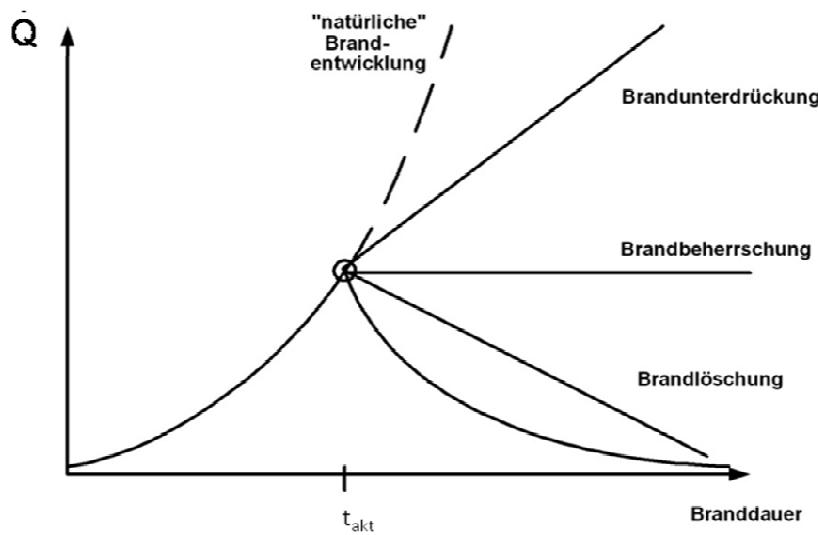


Bild 4.9 Modellcharakteristiken für den Einfluss von Löschmaßnahmen auf die Entwicklung eines Bemessungsbrandes

4.4.10.2 Löschmaßnahmen der Feuerwehr

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.

Sofern die Löschwirksamkeit der Feuerwehr angerechnet werden soll, ist dies vorab mit der zuständigen Stelle abzustimmen und zu vereinbaren.

4.4.10.3 Automatischen Löschanlagen

Ein Näherungsansatz für die mathematische Beschreibung der Brandentwicklung unter dem Einfluss von Sprinkleranlagen wird nachfolgend wiedergegeben.

Nachstehende Formel gibt einen in den USA entwickelten Algorithmus wieder, welcher die Wirkung des Sprinklerwassers auf die Wärmefreisetzung eines Brandherdes beschreibt [4.6], [4.11]:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}(t_{act}) \cdot \exp\left[\frac{-(t - t_{act})}{3,0 \cdot w^{-1,85}}\right] \quad (\text{Formel gilt nur für } t \geq t_{act}) \quad (4.30)$$

mit

$\dot{Q}(t)$ Wärmefreisetzungsrates unter Sprinklerschutz [kW]

t Zeit seit Brandbeginn [s]

t_{act} Zeitpunkt ab Brandbeginn, zu dem die erste Sprinklerdüse öffnet [s]

$\dot{Q}(t_{act})$ Wärmefreisetzungsrates beim Öffnen der ersten Sprinklerdüse (t_{act}) [kW]

w spezifische Wasserbeaufschlagung der Sprinkleranlage [mm/s] ($\geq 0,07 \text{ mm/s}$)

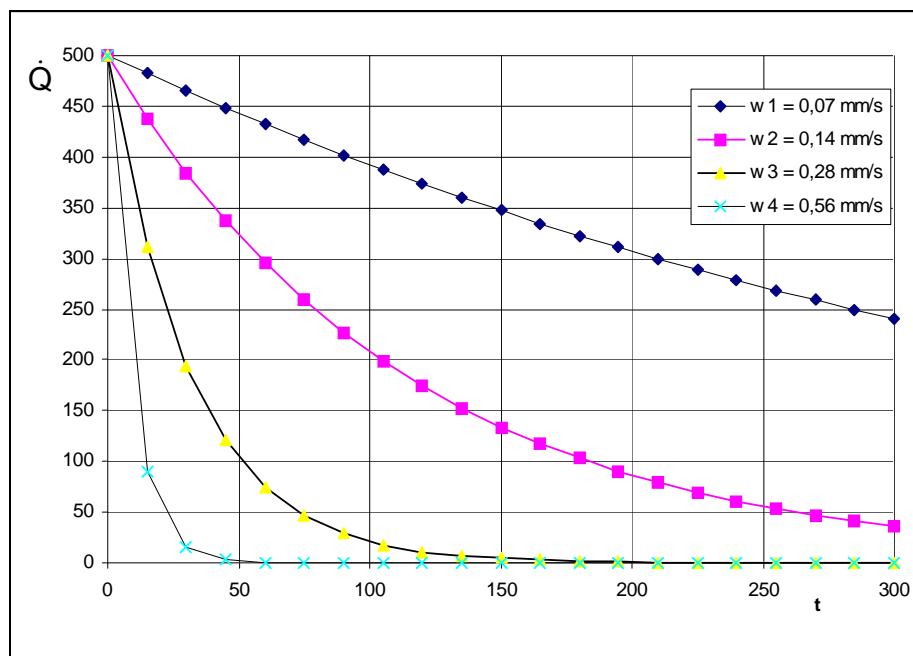


Bild 4.10 Einfluss der Sprinklerwirkung = f (Wasserbeaufschlagung)

Wegen der Ungewissheit der Einsatzgrenzen dieses Algorithmus sollte, nach Fleming [4.3], sein Einsatz auf „leichte Risiken“ [4.12] 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.

Bei Berücksichtigung der Sprinklerwirkung im Rahmen ingenieurmäßiger Nachweise wird i. A. die Kurve für die „Brandbeherrschung“ (s. Bild 4.9) empfohlen.

Spezielle Berechnungen, z. B. für besondere Raum- bzw. Brandgutkonfigurationen, als das mit analytischen Methoden möglich ist, können mit Brandsimulationsmodellen vorgenommen werden. Diese Modelle gestatten den Ansatz mehrerer Sprinkler und stellen die Wechselwirkung zwischen Brand- und Sprinklerwirkung besser dar, als empirische Relationen.

4.4.11 Rauchausbeuten

Neben den thermischen Auswirkungen von Bränden sind die sichttrübenden und toxischen Eigenschaften von Brandgasen entscheidend für den Nachweis der Personensicherheit. Da mit den Simulationsmodellen im Regelfall keine Verbrennung gerechnet wird, sondern die Brandwirkungen einer Brandverlaufskurve folgen, müssen auch die Rauchanteile, die im Brandverlauf entstehen können, vorgegeben werden. Vorzugeben sind: Die Ausbeuten Y_{CO_2} , Y_{CO} und $Y_{Ru\ddot{B}}$ in Gramm Rauchanteil pro Gramm verbrannten Stoffs [g/g] und das Rauchpotential D_m in [m^2/g].

Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten, diesen Quellterm der Rauchausbeuten zu bestimmen.

a) wenn die Brandstoffe hinreichend genau in Art und Menge abgeschätzt werden können:

Bestimmung der anteiligen Rauchausbeuten der Brandstoffe lt. Angaben im SFPE-Handbuch [4.37, 4.38] und Summenbildung zu den vorgenannten 4 Größen.

b) wenn keine konkreten Angaben zu Brandstoffen vorliegen:

Die Stoffverteilungen der jeweiligen Nutzung und der Brandphase können entsprechend prozentual unter Berücksichtigung der Angaben in Tabelle 4.9 abgeschätzt werden.

Tabelle 4.9 Übersicht zu statistisch gesicherten Y - und D_m -Werten

Brand- phase	Y_{CO_2}	Y_{CO_2}	Y_{CO}	Y_{CO}	$Y_{Ru\ddot{B}}$	$Y_{Ru\ddot{B}}$	D_m	D_m
	g/g	g/g	g/g	g/g	g/g	g/g	m^2/g	m^2/g
	Zellulose	Kunststoff	Zellulose	Kunststoff	Zellulose	Kunststoff	Zellulose	Kunststoff
gut- ventiliert- min	---	0,86	0,004	0,05	0,02	0,06	0,06	0,10
gut- ventiliert- mittel	0,83	0,97	0,034	0,07	0,053	0,11	0,10	0,134
gut- ventiliert- max	---	1,12	0,09	0,09	0,09	0,17	0,10	0,173
unter- ventiliert- min	1,25	1,45	0,07	0,11	---	0,07	---	0,14
unter- ventiliert- mittel	1,52	1,93	0,15	0,17	0,12	0,13	0,22	0,44 ¹³
unter- ventiliert- max	---	2,57	0,23	0,27	---	0,20	---	0,64 ¹⁴

¹³ Mittelwert plus Standardabweichung

¹⁴ außer Polystyrol mit einem D_m -Wert von 1,0 m^2/g

In der Tabelle 4.9 sind die entsprechenden Werte Stoffgruppen zugeordnet. Brennbare Flüssigkeiten lassen sie je nach Art in der Rauchausbeute sowohl den Größen der zellulosehaltigen Brandstoffe (z. B. Methanol, Ethanol) als auch den Kunststoffen zuordnen (z. B. Benzin, n-Hexan).

Rauchausbeuten für Cyanwasserstoff (HCN) müssen unter Berücksichtigung der möglichen im System vorkommenden Brandstoffe der Literatur [4.41] entnommen werden. Die Berechnung von HCN-Konzentrationen stellt den extremen Ausnahmefall im Rahmen der Anwendung von Ingenieurmethoden des Brandschutzes dar.

Die nicht ausgefüllten Felder bleiben weiteren Bearbeitungen vorbehalten. Die hierzu erforderlichen Größen können zur Zeit nicht mit ausreichender Sicherheit bereit gestellt werden.

Hinweise zum Umgang mit den Tabellenwerten

- a) Da sich die Brandverlaufskurven überwiegend auf einen Flammenbrand beziehen, wird auf Angaben zum Glimmbrand verzichtet. Sollte eine derartige Brandphase untersucht werden müssen, wird auf die Angaben im SFPE-Handbuch [4.37, 4.38, 4.42] verwiesen.
- b) Die in obiger Tabelle aufgeführten Werte sind statistische Größen, die folgende Grundlage haben:
 - 9 Originalbrandversuche
 - 14 bei Brandsimulationsrechnungen vielfach vorkommende Nutzungen,
 - 9 häufig vorkommende zellulosehaltige Stoffe und 18 Kunststoffe sowie
 - 7 Auswertungen repräsentativer Literaturstellen.

Es handelt sich hierbei um gemittelte und auf die zweite Stelle gerundete Werte von insgesamt 750 Einzelgrößen, die sich sowohl auf die Stoffe als auch auf die Nutzungen beziehen. Die Minimal- und Maximalwerte stellen die jeweilige Größe in der entsprechenden Stoffgruppe dar.

Anwendung zur Brandsimulation

- Wenn eine allgemeine Betrachtung zur Brandverlaufskurve nach der t^2 -Funktion vorgenommen wird, so können die Werte lt. Tabelle direkt den beiden Stoffgruppen und Brandphasen zugeordnet werden.
- Für die Fälle, wo Mischbrandlasten Nutzungen direkt zugeordnet werden können und eine Materialliste aufgestellt werden kann, ist die Reihenfolge des Abbrandes bei der Formulierung des Quellterms zu berücksichtigen.

Ausgehend von den Werten des SFPE-Handbuchs können die vier erforderlichen Eingabegrößen direkt Stoffen bzw. Gegenständen zugeordnet werden. So kann beim Brand z. B. in einer Eingangshalle die Zündstelle an einer Sitzgruppe erfolgen, deren Poster aus PUR-Schaum hergestellt sind – oder die Stühle sind aus Holz. Zu beiden Stoffen können dem SFPE-Handbuch die entsprechenden Y-Werte entnommen und zeitlich sowie auf die Brandverlaufskurve abgestuft bei der Brandsimulationsrechnung verwendet werden.

Folgende Lösungen sind hierzu möglich:

1. Realisierung abgestufter Rechenläufe bei Eingabe mehrerer Brandquellen, die über die Zeit oder die Temperatur nacheinander aktiviert werden
2. zu Brandsimulationsmodellen, die keine Differenzierung in der Eingabe zulassen, kann die Lösung mit zeitlich abgestuften einzelnen Rechengängen erfolgen
3. wenn man keine Differenzierung vornehmen kann oder möchte, ist die Berechnung der Rauchgaswirkungen unter Eingabe des jeweils höheren Wertes erforderlich

Abschließend sei darauf verwiesen, dass man im Zweifelsfall die genannte Literatur bemühen sollte, um zu vermeiden, dass bei konservativen Betrachtungen stets mit dem Maximalwert gerechnet wird [4.37, 4.41, 4.42, 4.43]. Der Vorteil der rechnerischen Methoden liegt ja gerade in der differenzierten Anwendung der Randbedingungen, die jedoch vor Aufnahme der Berechnungen mit allen am Bauvorhaben beteiligten – wie auch alle anderen Ansätze – abgestimmt werden müssen.

4.5 Darstellung der Bemessungsbrände in Programmcodes

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

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 Ausdehnung, Form und Lage der Brandquelle eine wichtige Rolle. Außerdem werden Umfang, Fläche, Form (rund oder rechteckig) oder Lage (frei oder in einer Ecke) der Brandquelle oft in empirischen Ansätzen (z. B. Plumemodelle) als Parameter benutzt, wie in Kapitel 5 ausführlich beschrieben.

Ausdehnung und Form der Brandquelle sind in 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 Wärmefreisetzungsraten eines Lachenbrandes von der Wärmestrahlung auf die Lachenoberfläche und damit von der Brandraumtemperatur ist ein Beispiel für einen starken Rückkopplungsmechanismus. Diese Wechselwirkung kann nur mit Feldmodellen abgebildet werden, in denen entsprechende Rückkopplungsmodelle enthalten sind.

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 die im allgemeinen zeitlich veränderlichen geometrischen Parameter der Brandquelle. Dies macht je nach Simulationsmodell unterschiedliche Eingabegrößen erforderlich.

Einen wichtigen Einfluss auf das Brandgeschehen hat die Lage der Brandquelle 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 und wird in Kapitel 5 ausführlicher diskutiert.

Ein Brand kann räumlich weitgehend begrenzt sein (z. B. der Abbrand eines isolierten Möbelstücks). Bei Bemessungsbränden hat man jedoch häufig eher eine für eine bestimmte Nutzung typische, jedoch nicht näher festgelegte Brandlast vor Augen, die sich innerhalb gewisser Grenzen flächenhaft ausbreitet.

Bei allen Rechenverfahren muss die Geometrie der Brandfläche möglichst realitätsnah abgebildet werden.

4.5.1 Flächenquellen

Die Abbildung der Flammenzone und des Rauchgasplume erfolgt bei Zonenmodell durch das eingesetzte Plumemodell, also mittels sogenannter Plumegleichungen. Der Ansatz dieser Gleichungen bezieht sich in der Regel auf eine kreisrunde Brandfläche; es liegen auch Gleichungen vor, die für rechteckige oder lang gestreckte Geometrien gelten. Längen-/Breiten-Verhältnisse müssen berücksichtigt werden. (vergl. Anlage zu Kapitel 5)

4.5.2 Volumenquellen

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

- Volumenquellen,
- Thermikstrahlen und
- vereinfachte Ansätze zur Verbrennungsmodellierung.

Bei Volumenquellen wird pro Zeiteinheit soviel Energie in einem bestimmten Volumenbereich freigesetzt, dass die durch den Bemessungsbrand vorgegebene (konvektive) Brandleistung $\dot{Q}_c(t)$ (gesamte Wärmefreisetzung $\dot{Q}(t)$ abzüglich Strahlungsanteil) exakt erreicht wird.

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 miteinander verträglich sind. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Temperatur im Bereich der Brandquelle die typische Flamenttemperatur

von etwa 800 °C - 1300 °C deutlich über- oder unter schreitet (Bild 4.11). Man kann eine typische Energiedichte pro Zeiteinheit innerhalb der Verbrennungszone ($1,2 - 1,8 \text{ MW/m}^3$) heranziehen, um damit die erforderliche Höhe der Volumenquelle festzulegen bzw. automatisch vom CFD-Programm für jeden Zeitschritt berechnen zu lassen. Alternativ lassen sich auch semi-empirische Flammenmodelle in Kombination mit CFD-Modellierung benutzen, um die Geometrie der Brandquelle genauer zu bestimmen (z. B. auch für Wärmestrahlungsberechnungen [4.29]).

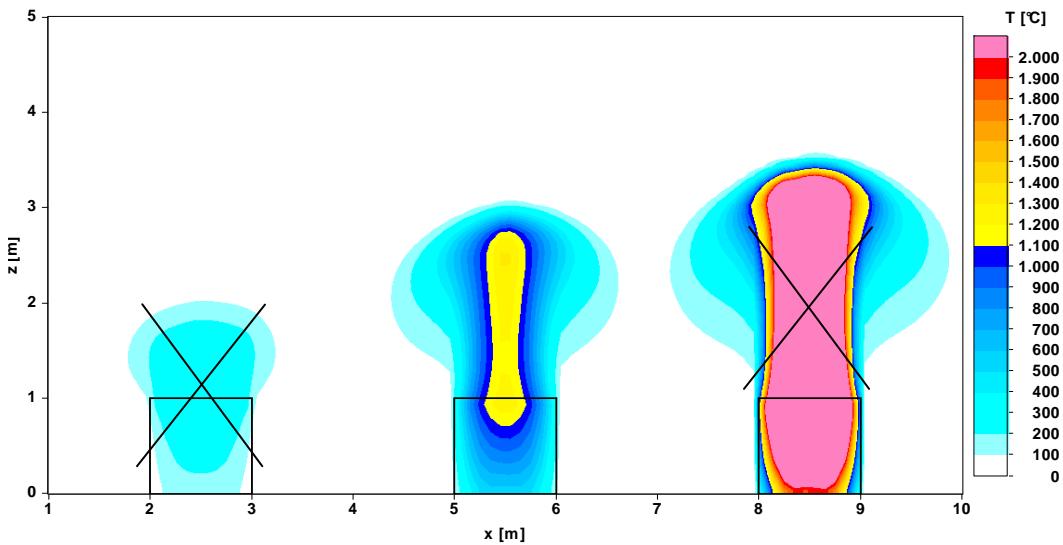


Bild 4.11 Freisetzung von 500 kW (links), 2 MW (Mitte) und 5 MW (rechts) in einem Volumen von 1 m^3 , die Vorgabe der links und die rechts dargestellten Volumenquelle führt zu unrealistischen Temperaturwerten

4.5.3 Thermikstrahlen

Bei Thermikstrahlen wird ein heißes Gas (normalerweise Luft) mit einem bestimmten Volumen- bzw. Massenstrom im Bereich der Brandquelle zugeführt. Mit Volumenquellen und Thermikstrahlen lassen sich zwar im Prinzip ähnliche Temperaturprofile im Brandbereich erzeugen. Um die thermischen und geometrischen Strahlparameter in Abhängigkeit von der gewünschten Wärmefreisetzungsraten $\dot{Q}(t)$ bzw. $\dot{Q}_c(t)$ festzulegen, ist jedoch 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.

4.5.4 Vereinfachte Ansätze zur Verbrennungsmodellierung

Ein typischer Vertreter der vereinfachten Ansätze zur Verbrennungsmodellierung ist das so genannte „mixture fraction combustion model“ [4.30]. Dabei wird unter der Annahme von im Vergleich zur hydrodynamischen Zeitskala unendlich schnell ablaufenden chemischen Verbrennungsprozessen eine oder mehrere zusätzliche Transportgleichungen für eine repräsentative Mischungsvariable oder den unverbrannten Brennstoff abgeleitet, deren Lösung die Ausdehnung der Flamme („flame sheet“) und damit den Bereich für die lokale Energiefreisetzung bestimmt.

zung liefert. Bei diesem Verfahren kann (u. U. bis auf leichte Schwankungen um einen Mittelwert) die Wärmefreisetzungsraten ebenfalls vorab festgelegt werden, so dass wie bei der Volumenquelle ein bestimmter Bemessungsbrand berechnet werden kann. Obwohl diese Methode konzeptionell der reinen Volumenquelle überlegen ist, ergeben sich bei praktischen Anwendungen für brandlastgesteuerte Verbrennung meist sehr ähnliche Resultate [4.39].

Weiterhin werden neben der Wärmefreisetzungsraten und den Vorgaben bzw. Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Flammengeometrie gegebenenfalls noch weitere Größen zur Festlegung eines Bemessungsbrandes benötigt, z. B.:

- Heizwert (effektive Verbrennungswärme)
- Sauerstoffbedarf
- Ausbeute von Verbrennungsprodukten (Erzeugungsraten)
- Rauchpotential

Weitere Angaben zu diesen Größen finden sich in Kapitel 8.

4.6 Literatur

- [4.1] NFPA 92 B: Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas. NFPA, 1995, Quincy MA (USA).
- [4.2] 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).
- [4.3] 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.
- [4.4] *BUKOWSKI, R. W.*: How to Evaluate Alternative Designs Based on Fire Modelling. NFPA Journal, March / April 1995, NFPA, Quincy MA (USA).
- [4.5] *WALTON, W.; BUDNICK, E.*: Quick Response Sprinkler in Office Configurations: Fire Test Results. NBSIR 88-3695, U.S. Department of Commerce, 1988, USA.
- [4.6] *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.
- [4.7] *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).

- [4.8] 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).
- [4.9] WALTON, W. D.: Quick Response Sprinklers in Chemical Laboratories: Fire Test Results. NISTIR 89-4200, U.S. Department of Commerce, 1989, USA.
- [4.10] HÄGGLUND, B.; WICKSTRÖM, U.: Smoke Control in Hospitals – A Numerical Study. *Fire Safety Journal* Vol. 16 No. 1, 1990, Elsevier Science, Barking, Essex (GB).
- [4.11] EVANS, D.: Sprinkler Fire Suppression Algorithm for Hazard. NISTIR 5254, 1993, U.S. Department of Commerce, Technology Administration, USA.
- [4.12] NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems. NFPA, 1994, Quincy MA (USA).
- [4.13] SCHNEIDER, U.: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz. 3. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 2004. ISBN 3-8041-4189-7
- [4.14] Beuth-Kommentare: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Kommentar zu DIN 18230. 3te Auflage, Beuth-Verlag, 2003.
- [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] ZEHFUß, J.: Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung. Dissertation Technische Universität Braunschweig, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2004.
- [4.17] ZEHFUß, J.; HOSSER, D.: Vereinfachtes Naturbrandmodell für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken, In: *Bauphysik* 27 (2005) Heft 2. S. 79-86.
- [4.18] ZEHFUß, J.: Risikogerechte brandschutztechnische Bemessung mehrgeschossiger Wohn- und Bürogebäude am Beispiel der Stahlbauweise, In: *Bauingenieur*, Band 77, Juli / August 2002, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag (2002), S. 336-343.
- [4.19] 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.
- [4.20] 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.
- [4.21] 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.
- [4.22] DIN EN 1991-1-2 / Eurocode 1: Brandeinwirkungen auf Tragwerke - Fassung: 9 / 2003.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

- [4.23] Nationaler Anhang zu DIN EN 1999-1-2/NA, Ausgabe April 2009, Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [4.24] 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 - 2008 / wird fortgesetzt.
- [4.25] 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.
- [4.26] Autorenkollegium, Brandschutz - Formeln und Tabellen, Staatsverlag der DDR, Berlin, 1979.
- [4.27] 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).
- [4.28] Internetzugang des NIST der U.S.A , <http://fire.nist.gov/fire/fires>.
- [4.29] 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.
- [4.30] FLOYD, J.E.; BAUM, H.R.; McGRATTAN, K.B.: A Mixture Fraction Combustion Model for the Fire Simulation Using CFD, International Conference on Engineered Fire Protection Design. Society of Fire Protection Engineers (SFPE) and National Institute of Standards and Technology (NIST), June 11-15, 2001, San Francisco, CA, 279-290 pp, 2001.
- [4.31] VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), 10., überarbeitete Auflage, Springer, Berlin, 2006.
- [4.32] Brandrisikobewertung, Berechnungsverfahren, SIA 81, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 1984.
- [4.33] KARSLON, B.; QUINTIERE, J. G.: Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, London, 1999.
- [4.34] BASCHKIRZEW, M. P.: Aufgaben zur Wärmeübertragung, Staatsverlag der DDR, Berlin 1979.
- [4.35] Fire Code Reform Centre Limited, Fire Engineering Guidelines, Sydney, New South Wales, Australia, 1997.
- [4.36] BUCHANAN, A. H. (Hrsg.): Fire Engineering Design Guide, Second Edition, Centre of Advanced Engineering, Christchurch, New Zealand, 2001.

- [4.37] MULHOLLAND, G. W.: Smoke Production and Properties. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth Edition, Quincy, Massachusetts (USA), S. 2-291 - 2-302. 2008.
- [4.38] GOTTUK, D. T.; LATTIMER, B. Y.: Effect of Combustion Conditions on Species Production. In: DiNenno, P. J. et al. (Hrsg.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth Edition, Quincy, Massachusetts (USA), S. 2-67 – 2-95. 2008.
- [4.39] SCHNEIDER, V.: Mathematical and physical modelling of smoke spread in atria-type experimental set-ups, Proceedings Interflam '07, Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh 2007.
- [4.40] NFPA 204 M: Guide for Smoke and Heat Venting. NFPA, 2007, Quincy, MA (USA).
- [4.41] BUFF, K. GREIM, H.: Abschätzung gesundheitlicher Folgen von Großbränden, Schriftenreihe Zivilschutzforschung, Band 25 – 1997.
- [4.42] TEWARSON, A.: Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products. In: DiNenno, P. J. et al. (Hrsg.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth Edition, Quincy, Massachusetts (USA), S. 3-109 – 3-194. 2008.
- [4.43] STEINERT, C.: Messung und Simulation von Fahrzeugbränden in Tunneln, Dissertation TU Braunschweig, Verlag Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, 1997, ISBN 3-932243-26-9.

Anhang zu Kapitel 4

Die Angaben in den Tabellen zu diesem Kapitel wurden ausgewählt, um dem Anwender Hinweise zu geben, mit welchen Größen bezogen auf die einzelnen Parameter, zu rechnen ist.

Es wurden bei der Überarbeitung des Kapitels 4 nur Angaben in die Tabellen 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.

In den Tabellen zu den Nutzungen (A4.1) sind keine Maximalwerte enthalten. Der Anwender muss unter Berücksichtigung der Baugröße und der flächenspezifischen Wärmefreisetzungsr率e den Wert \dot{Q}_{\max} bestimmen und unter Berücksichtigung der Öffnungsbedingungen gem. Abschnitt 4.4.8.2 des Kapitels 4 kontrollieren.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

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

Material bzw. Nutzung	Hinweise / Bedingungen	Brandbelastung MJ/m ²	Heizwert MJ/kg ¹⁵	Brandentwicklung ¹⁶	$\dot{q} = f(A)$ kW/m ² ¹⁷	Quelle
Wohnraum		780 / 1085	19,5	300	250	[4.23]
Büroraum		420 / 584	20,5	300	250	[4.23]
Krankenzimmer	2 Betten	230 / 320	22,5	300	250	[4.23]
Hotelzimmer	2 Betten, Möbel aus Holzspantafeln	310 / 431		300 [4.2]	250 [4.1]	[4.23]
Schule: Klassenraum	Möbel aus Holz, Sitze aus Formsperrholz	285 / 397	18,2	300	150	[4.23]
Hörsaal	Sitze aus Formsperrholz, Kleidung und Taschen	140 / ---	25	1.200	130	[4.24]
Eingangshalle	Empfangstresen, wenige Möbel mit geringer Polsterung	400 / ---	19,2	450	240	[4.24]
Einkaufszentrum		600 / 835		150	250	[4.23]
Theater (Kino) / Zuschauerraum	gepolsterte Sitze	300 / 417		150 - 450	250 - 500	[4.23], [4.24]
Verkehr (öffentlicher Bereich)		100 / 139		600	250	[4.23]
Bücherei	mit Metallregalen	1.500 / 2.087	18,4	450 ¹⁸	200 - 500	[4.24]
Drogerie-markt	geringe Anteile brennbarer Flüssigkeiten	760 / ---	28 - 32	200	300	[4.24]

¹⁵ bezogen auf in den meisten Fällen vorliegende Mischbrandlasten; dieser Begriff ist ganz allgemein als eine Mischung von Brandstoffen entsprechend der jeweiligen Nutzung zu verstehen;

¹⁶ Steuergröße t_α nach DIN EN 1991-1-2, Anhang E.4, [4.22] (t_α entspricht t_g)

¹⁷ alle Werte ohne Sprinklerschutz

¹⁸ Werte wurden korrigiert bzw. ergänzt, da die Angabe in der DIN EN 1991-1-2 nicht den Messungen aus Brandversuchen entspricht; vgl. [4.24]

Tabelle A4.2 Kennwerte für Nutzungen zur Abschätzung und zur Erarbeitung der Quellterme
(Fortsetzung)

Material bzw. Nutzung	Hinweise / Bedingungen	Brandbelastung MJ/m ²	Heizwert MJ/kg ¹⁹	Brandentwicklung ²⁰	$\dot{q} = f(A)$ kW/m ² ²¹	Quelle
Gaststätte	leichte Polstersitze, Holztische	600 - 700 / ---	18 - 25	200 - 300	280	[4.27]
	Polsterstühle, Holztische, Sitzgruppen, Polstermöbel, schwere Wohnraumtextilien	1.100 / ---	17 - 20	200	330 - 620	[4.24]
Garderobe	ca. 12 m ²	720 / ---	21	180 - 250	430	[4.24]
kleiner Kiosk	ca. 15 m ²	650 / ---	22,5	200 - 300	285	[4.24]
Verkaufsstand	2 x 2 m	--- / ---	19,5	300	400	[4.28]

Erläuterung:

- Brandlast: erste Zahl entspricht dem Mittelwert;
zweite Zahl entspricht der 90 %-Fraktile (bei den EC-Daten [4.23] 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 Wärmefreisetzungsraten abgeschätzt.
- Sprinklerschutz: Da die Angaben zur Wärmefreisetzungsraten unter Sprinklerschutz sehr streuen und die damit im Zusammenhang stehenden Randbedingungen nicht umfassend in der Literatur erläutert sind, wird empfohlen, die Brandleistung unter Sprinklerschutz nach Abschnitt 4.4.10.3 des Kapitels 4, Sprinklerwirkung, zu bestimmen.

¹⁹ bezogen auf in den meisten Fällen vorliegende Mischbrandlasten; dieser Begriff ist ganz allgemein als eine Mischung von Brandstoffen entsprechend der jeweiligen Nutzung zu verstehen;

²⁰ Steuergröße t_α nach DIN EN 1991-1-2, Anhang E.4

²¹ alle Werte ohne Sprinklerschutz

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Tabelle A4.3 Angaben zur Brandentwicklung für ausgewählte Lagerungsarten unter Berücksichtigung der Lagerungshöhe (aus Versuchen im Maßstab 1:1 nach den angegebenen Quellen)

Waren	Lagerungsart	Lage- rungs- höhe [m]	Brandent- wicklung	Max. spezifi- sche Wärme- freisetzungsr- ate [kW/m ²]
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	0,5	mittel - schnell	1.249
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	1,5	schnell	3.746
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	3,0	schnell	6.810
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	4,9	schnell	10.215
Holzpaletten (Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.40]	gestapelt	0,46		1.420 *
Holzpaletten (Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.40]	gestapelt	1,52		4.000 *
Holzpaletten (Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.40]	gestapelt	3,05		6.800 *
Holzpaletten (Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.40]	gestapelt	4,88		10.200 *
Postsäcke, gefüllt [4.40]	gelagert	1,52		400 *
Kartons (compartmented) [4.40]	gestapelt	4,5		1.700 *
PE-Briefablagekästen gefüllt [4.40]	gestapelt auf einem Wagen	1,5		8.500 *
PE-Müllfässer in Kartons [4.40]	gestapelt	4,5		2.000 *
PE-Fiberglas Duschtrennwände in Kartons [4.40]	gestapelt	4,6		1.400 *
FRP-Flaschen in Kartons verpackt [4.40]	gestapelt	4,6		3.400 / 6.200 *

Waren	Lagerungsart	Lage- rungs- höhe [m]	Brandent- wicklung	Max. spezi- fische Wärme- freisetzungsr- ate [kW/m ²]
PE-Flaschen in Kartons [4.40]	gestapelt	4,5		2.000 *
PU-Hartschaum-Isolationsplatten [4.40]	gestapelt	4,6		1.900 *
FRP-Gefäße in Kartons verpackt [4.40]	gestapelt	4,6		14.200 *
PS-Röhren ineinander geschachtelt in Kartons [4.40]	gestapelt	4,2		5.400 *
PS-Spielzeugteile in Kartons [4.40]	gestapelt	4,5		2.000 *
PS-Hartschaum-Isolationsplatten [4.40]	gestapelt	4,2		3.300 *
FRP-Röhren in Kartons verpackt [4.40]	gestapelt	4,6		4.400 *
PP und PE Folienrollen [4.40]	gestapelt	4,1		6.200 *
PE-Flaschen in unterteilten Kartons [4.1]	Regale	4,6	sehr schnell	6.242,5
PE-Flaschen in unterteilten Kartons [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	4,6	sehr schnell	1.929,5
PU-Hartschaum Isolationsplatten [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	4,6	sehr schnell	1.929,5
PS-Becher in unterteilten Kartons [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	4,6	sehr schnell	13.620,0
PS-Hartschaum Isolationsplatten [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	4,3	sehr schnell	3.291,5
PVC-Flaschen in unterteilten Kartons [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	4,6	sehr schnell	3.405,0
PP-Kübel in unterteilten Kartons [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	4,6	sehr schnell	4.426,5
PP oder PE Folienrollen [4.1]	gestapelt / Block- lagerung	4,3	sehr schnell	3.972,5

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Waren	Lagerungsart	Lage- rungs- höhe [m]	Brandent- wicklung	Max. spezifi- sche Wärme- freisetzungsr- ate [kW/m ²]
Methyl-Alkohol [4.40]				600 *
Benzin [4.40]				2.500 *
Kerosin / Petroleum [4.40]				1.700 *
Schweröl, Nr. 2 [4.40]				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				
* Wärmefreisetzungsrates pro m ² Grundfläche des vollständig beteiligten Brandgutes; basierend auf vernachlässigbarem radiativem Feedback der Umgebung und 100 %iger Verbrennungseffektivität				
Erzeugnis	Lagerungsart / Lagerungshöhe [m]	Wärmefreisetzungsrates [kW]		
Holz oder PMMA [4.40]	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 horizontalen Fläche	720 je m ² Fläche		
Polysyrol (fest) [4.40]	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) [4.40]	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		

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	[4.28]
Papierkorb	30 - 45	180 - 450	[4.24]
PC-Bildschirm	45	900 - 1.500	[4.24]
Reisetasche	55 - 100	150 - 300	[4.24]
Schreibtischsessel ²²	65	200 - 450	[4.24]
PUR-Weichschaummatratze Deutsche Produktion	190	60 - 850	[4.24]
Federkernmatratze U.S.-Produktion	700	220 - 350	[4.28]

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

²² teils mit sehr starker Rauchentwicklung brennend

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Tabelle A4.6 Bemessungsbrände nach DIN 18232 unter Berücksichtigung des Beginns der Brandbekämpfungsmaßnahmen

Bemessungswert	Einheiten	Bemessungsgruppe				
		1	2	3	4	5
Branddauer bis zum Wirken der Löschmaßnahmen	min	5	10	15	20	> 20
Brandfläche	m ²	5	10	20	40	80
Wärmefreisetzungsraten für natürliche RA: $q = 300 \text{ kW/m}^2$	kW	1.500	3.000	6.000	12.000	24.000
Wärmefreisetzungsraten für maschinelle RA: $q = 600 \text{ kW/m}^2$	kW	3.000	6.000	12.000	24.000	48.000

Tabelle A4.7 Angaben zu Brandlasten für verschiedene Nutzungen

Nutzung	Mittlere Brandbelastung q (MJ/m ²)	Quelle	Hinweis
Abstellraum für Büro und Gewerbegebauten	500	[4.32]	
Autolackiererei	500	[4.32]	
Auto-Reparaturwerkstatt	300	[4.32]	[4.14] Tabelle 10-2, 90% Fraktilwert: 338 MJ/m ²
Baustofflager	270 ²³	[4.32]	Angabe in [4.32]: 800 MJ/m ³ [4.14] Tabelle 10-2, 90% Fraktilwert: 266 MJ/m ²
Datenverarbeitung, Rechenzentrum	400	[4.32]	
Labor, Chemie	500	[4.32]	
Kindergarten	300	[4.32]	
Möbelfabrik	550	[4.32]	
Wohnungskeller	900	[4.32]	

²³ Der Wert bezieht sich auf eine angenommene Lagerraumhöhe von 3 m

Tabelle A4.8 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 [4.5]	langsam	1,8
PC-Arbeitsplatz; massive Möbel (Holzspanplatten); Versuch in einem Raum mit ISO 9705-mäßigen Abmessungen [4.5]	langsam	2,5
PC-Arbeitsplatz in einem Großraumbüro; massive Möbel (Holzspanplatten) und mit brennbaren Wandschirmen unterteilt [4.6], [4.7]	schnell	6,8
Büro; Papier – Dokumentation auf Metallregalen; freie Verbrennung [4.5]	bis 200 s - mittel und nach 200 s - schnell	1,6
Büroeinheit; massive Möbel (Holzspanplatten); Versuch in einem Raum mit ISO 9705-mäßigen Abmessungen [4.5]	langsam	2,25
Verschiedene Büro-Gegenstände (Ausrüstung von Arbeitsplätzen); freie Verbrennung [4.6]	im Durchschnitt langsam	-
Mobile Metallregale mit Archivdokumenten [4.8]	schnell	-
Pkw in einem öffentlichen Parkhaus [4.25]	langsam	2,0 bis 5,5
Charmelabor [4.9]	sehr schnell	2,0
Diverse Ausstellungen [4.1]	langsam	-
Normales Bett in einem schwedischen Spital [4.10]	langsam	0,3

5 MODELLE FÜR DIE BRANDSIMULATION

5.1 Zielsetzung der Brandmodellierung und Kapitelüberblick

5.1.1 Kapitelüberblick

Das Kapitel 5 gliedert sich in sechs Teile. Im ersten Kapitel werden die wesentlichen Zielsetzungen der Brandsimulation definiert und die weiteren Kapitel beschäftigen sich mit unterschiedlichen Fragestellungen der Simulation. In den Kapiteln 5.2 bis 5.4 steht die Erläuterung der einzelnen Modelle im Vordergrund. Hier wird versucht, die Grundlagen der einzelnen Modelle zu beschreiben, bzw. es wird auf weiterführende Literatur verwiesen.

Das Kapitel 5.5 beschäftigt sich mit der Modellbewertung und zeigt anhand von Vergleichen zwischen Rechenergebnissen und experimentellen Ergebnissen auf, wie die Modellbewertung praktisch durchgeführt werden kann, bzw. welche Eigenschaften die Modelle aufweisen, für die diese Berechnungen ausgeführt wurden. Daraus ergeben sich überdies Hinweise für die Anwendbarkeit der einzelnen Modelle oder die vorhandenen Einschränkungen hinsichtlich der Aussagefähigkeit.

Kapitel 5.6 gibt Hinweise für die Anwendung von Modellen.

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 Aufpunkten.

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 Überblick über die verfügbaren Brandmodelltypen

5.2.1 Einleitung

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.

5.2.2 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 Zielsetzungen nicht relevant und werden im Folgenden deshalb nicht behandelt.

Grundsätzlich lassen sich drei Gruppen von mathematischen deterministischen Brandsimulationsmodellen unterscheiden:

- Empirisch belegte Ansätze,
- Zonenmodelle,
- Feldmodelle (CFD)

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. Durch geeignete Experimente werden die wesentlichen Einflussparameter und ihr Zusammenhang ermittelt und in Form vereinfachter Gleichungen dargestellt. Daraus ergeben sich empirisch belegte Modellansätze für spezielle Problemstellungen, die teilweise selbst Bestandteil von komplexeren Rechenverfahren sind. Bei Anwendung dieser Ansätze ist daher deren Gültigkeitsbereich und die mitunter angegebene Fehlergrenze zu beachten.

Zonen- und Feldmodelle unterscheiden sich dadurch, dass die Feldmodelle im Allgemeinen unmittelbar auf den fundamentalen Gleichungen beruhen, während die Zonenmodelle vereinfachte Gleichungssysteme beinhalten, die mit Hilfe der empirischen Ansätze aus den fun-

damentalen 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.

In der nachstehenden Tabelle 5.1 werden einige prinzipielle Eigenschaften von Zonen- und Feldmodellen unter dem Gesichtspunkt des Brandschutzingenieurs 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 Feldmodellen unterschiedlich, d. h. der Umfang der berechneten Größen weicht stark voneinander ab.

Tabelle 5.1: Grundsätzliche Eigenschaften von Feld- und Zonenmodellen (siehe auch [5.36, 5.37, 5.38])

Eigenschaft	Zonenmodell	Feldmodelle
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

5.2.3 Physikalische Modelle

Das physikalische Modell kopiert eine reale Situation (Nachbau in verkleinertem Maßstab) unter Berücksichtigung von Skalierungen und Ähnlichkeitsgesetzen. Ein bekanntes Beispiel aus dem Forschungsbereich der Strömungsmechanik sind Windkanalversuche, bei denen die Reynoldszahl als Skalengesetz benutzt wird. In der Brandforschung sind 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.

5.2.4 Grundlegende Vorgaben

Für alle Modelle gilt, dass grundsätzliche Vorgaben gemacht werden müssen. Dazu gehören die Gebäudegeometrie, Wände, Öffnungsflächen und die Stoffdaten der Begrenzungen (Randbedingungen) 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 Feldmodellen 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 Materialzusammensetzungen für die Umfassungen notwendig.

Wesentlichste Eingabe ist der Brandverlauf und die damit in Verbindung stehenden Stoffdaten. Hinsichtlich des Brandverlaufs ist eine Modellierung des Verbrennungsprozesses, welche auf fundamentalen Eigenschaften beruht, heute nur in sehr begrenztem Umfang möglich. Die Modellierung des eigentlichen Verbrennungsvorgangs spielt praktisch nur im Wissenschaftsbereich eine Rolle und ist für allgemeine Vorhersagen noch nicht anwendungsreif. 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 stehen. Man hat sich daher einen anderen Zugang zu der Problemstellung verschafft, in dem man ausgehend von Experimenten bestimmte Brandverläufe unterstellt oder phänomenologische Ansätze (siehe 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 Wärmefreisetzungsrat) zugeordnet wird. Bei der Untersuchung der Brandausbreitung über mehrere Objekte sind darüber hinaus detailliertere Angaben notwendig, welche beispielsweise die Wärmeübertragung oder die Entzündung beeinflussen.

Bei jedem Brandverlauf ist 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 Brandguts 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.

5.3 Beschreibung der mathematischen Modelle

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.

Ein Feuer wird i. A. nicht erloschen, 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 das Feuer weiter an, bis es durch die Brandlastanordnung oder durch Eingriff von außen eine Begrenzung erfährt.

Mit dem Verbrennungsvorgang ist die Flammen- und Plumebildung verknüpft. Der Plume (Rauchgassäule) wird durch die aufsteigenden heißen Gase 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 Verbrennungszenen absorbiert und erhöht dadurch die Temperatur der Gase und der darin enthaltenen festen 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 Plumeströmung 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 das Feuer 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 Ab-

brandrate des brennenden Objekts, sondern kann auch weitere brennbare Objekte entzünden (Flash-over). Anderseits 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.

Die geschilderten Vorgänge sind als mathematische beschriebene Vorgänge Bestandteil von Brandsimulationsmodellen. 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
- physikalische Modellierung im verkleinerten Maßstab unter Beachtung von Ähnlichkeitsgesetzen.

Vereinfachend ausgedrückt führt der erste Ansatz zu den Feldmodellen und der zweite Ansatz zu den Zonenmodellen, bei denen insbesondere der Impulserhaltungssatz in der allgemeinen Form nicht mehr berücksichtigt wird. Auch bei den Feldmodellen sind jedoch Unterschiede hinsichtlich des Umfangs der berücksichtigten Fundamentalgleichungen zu verzeichnen. Beim dritten Ansatz werden aus den fundamentalen Gleichungen Ähnlichkeitsgruppen abgeleitet, die bei der Modellierung im verkleinerten Maßstab anzuwenden sind.

5.3.1 Empirische Korrelationen

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 röhrt 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 A5.2 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 Feuerplumes, 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 - 5.5] behandelt. Im weiter unten beschriebenen Ansatz der Zonenmodelle steigt diese Rauchgas-säule (Plume) bis zur Ausbildung einer definierten Rauchgasschicht bis zur Decke auf und breitet sich dort in radialer Richtung aus (Ceiling Jet). 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 A5.2 zusammengefassten Erläuterungen.

5.3.2 Vollbrandmodelle

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. Das Modell geht daher davon aus, dass der gesamte Raum mehr oder weniger mit Rauchgasen gefüllt ist, was wiederum das Fehlen einer effektiven Entrauchung voraussetzt.

Entsprechend der praktischen Erfahrung bei vollentwickelten Bränden in kleineren Räumen wird daher 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, so dass 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:

- 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,
- 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 5.4 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:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Dichte} \quad (5.1)$$

$$E = c_v \cdot m \cdot T \quad (E = \text{innere Energie bei konstantem Volumen}, \\ c_v = \text{spezielle Wärme bei konstantem Volumen}) \quad (5.2)$$

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (\text{Zustandsgleichung für ideale Gase, } R = \text{allg. Gaskonstante}) \quad (5.3)$$

5 Modelle für die Brandsimulation

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

Der einfachste Weg zur Beschreibung der durch ein Feuer freigesetzten Wärme besteht in den Angaben einer Kurve für die Energiefreisetzungsraten in Abhängigkeit von Zeit. Diese Kurven basieren auf experimentellen Ergebnissen, die für die aktuelle Situation eine angemessene Abschätzung darstellen oder auf Festlegungen, die in Übereinstimmung mit sogenannten design-fires gewählt werden. Diese einfache Art eines „Verbrennungsmodells“ kann durch Berücksichtigung der Ventilationsbedingungen (Sauerstoffzufuhr) verbessert werden.

Obwohl der Druck im Raum näherungsweise als konstant angegeben wird, sind die kleinen 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 auftreffende 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 derzeit verwendeten 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.

Energiebilanz- und Massenbilanzgleichung

Das generelle Konzept besteht wie gesagt darin, die Rauchgastemperatur aus der Energiebilanz zu bestimmen. Eine anschauliche Darstellung dieser Energiebilanz vermittelt Bild 5.4.

Die innere umschließende Fläche wird mit A_i , die Fensterfläche mit A_w bezeichnet. Es ist 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:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_l + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0 \quad (5.4)$$

Folgende Energieterme sind darin enthalten:

- \dot{h}_c die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandnebenerscheinungen im Brandraum freigesetzte Energie
- \dot{h}_l 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

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_l + \dot{R}) = 0 \quad (5.5)$$

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

- \dot{m}_g die pro Zeiteinheit aus dem Brandraum strömenden Rauchgasmengen
- \dot{m}_l die pro Zeiteinheit in den Brandraum einströmenden Frischluftmengen
- \dot{R} die pro Zeiteinheit umgesetzte Brandlast, welche die Energiefreisetzung bewirkt

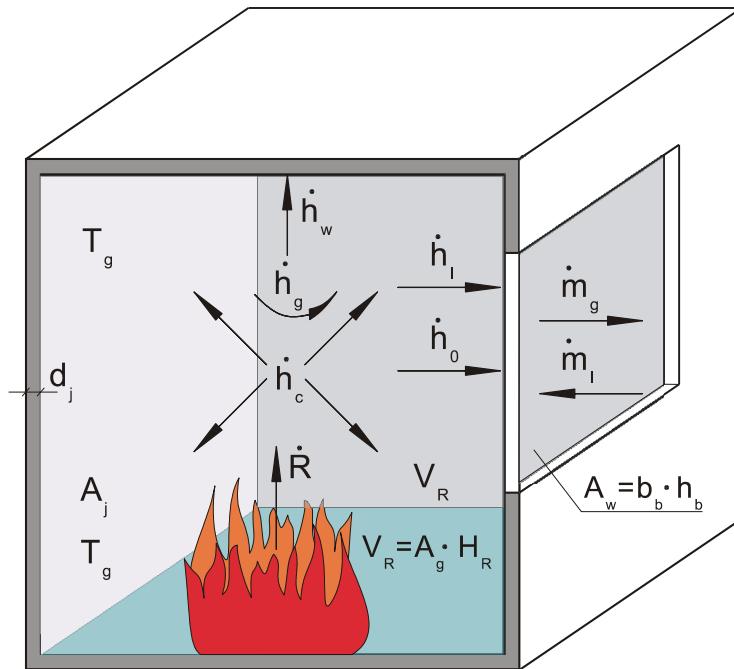


Bild 5.4 Geometrie, Wärme- und Massenströme des Wärmebilanzmodells [5.37]

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 Brand-szenarien (z. B. bei geringer Brandbelastung), die eine gleichmäßige Erwärmung des Raumes nicht erwarten lassen.

5.3.3 Zonenmodelle

Mit zunehmendem Kenntnisstand der Brandforschung wurde 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 darunter liegenden 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 beschreiben. Damit werden sowohl die Gleichungen komplexer als auch die benötigten Submodelle.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Zonenbezeichnung nicht einheitlich gebraucht wird. Im Grunde sind darunter die o. g. Kontrollvolumina zu verstehen. Häufig werden jedoch auch andere relevante Bereiche wie Wände, Decken und zusätzliche brennbare Objekte als eigene Zonen aufgefasst.

Die angewandten grundlegenden Gleichungen bestehen wiederum aus den Erhaltungssätzen für die Masse und der Energie, die nun jeweils auf die Zonen angewandt werden. Die theoretische Basis lässt sich nun folgendermaßen formulieren. Das Gas in der jeweiligen Schicht ist durch die Masse, innere Energie, Temperatur, Dichte und das Volumen definiert. Der Massenstrom und der Energiestrom zu den beiden Schichten werden auf der Basis bestehender Submodelle berechnet.

Die Mehrzonenmodellierung basiert im Wesentlichen auf folgenden Annahmen:

- Im Brandraum kommt es zur Ausbildung zweier unterschiedlicher Gasschichten, der oberen heißen Rauchgasschicht und der relativ klaren und kühleren Luftsicht.
- Die Schichten werden durch eine imaginäre horizontale Trennfläche getrennt, die im Prinzip als Barriere gegen einen Massenaustausch wirkt (abgesehen vom Plume-Massenstrom und speziellen Effekten).
- Jede Schicht hat eine einheitliche mittlere Temperatur.
- Die Fluide innerhalb der Zonen werden als ruhend angenommen (außer Plume, Ceiling Jet und Ventilationsöffnungen), und der Druck ist nur eine Funktion der Höhe und der Zeit.

Die auf den ersten Blick relativ geringfügig erscheinenden Erweiterungen gegenüber dem Vollbrandmodell erlauben es dennoch, auch die Verhältnisse vor dem Flash-over mit der Rauchgasschichtung, dem Strahlungsaustausch zwischen unterschiedlichen Bereichen im Brandentwicklungsstadium, der Rückführung von Rauchgasen in die kühlere Luftsicht 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:

5 Modelle für die Brandsimulation

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i}$$

$$E_i = c_V \cdot m_i \cdot T_i \quad (5.6)$$

$$p = R \cdot \rho_i \cdot T_i$$

$$V = V_s + V_l$$

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 Energiefreisetzungsr率e 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 CO₂, CO und HCN oder die Rußpartikel, welche für die Sichtetrübung 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 Energiefreisetzung oder der Abbrandrate in Abhängigkeit von den Bedingungen innerhalb des Brauerraums. Es ist jedoch notwendig, darauf hinzuweisen, dass dies nur für wenige reine Brennstoffe und sehr einfache Brennstoffgeometrien möglich ist. Im Allgemeinen muss der Verlauf der Abbrandrate oder der Energiefreisetzungsr率e vom Nutzer vorgegeben werden. In diesem Sinn kann daher i. A. nicht von einer Vorhersage des Brandverlaufs gesprochen werden.

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 Zonenmodellen 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 nach wie vor 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 wird wiederum durch die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung beschrieben.

Die bisher genannten Submodelle sind notwendige Bestandteile von Zonenmodellen. Darüber hinaus können jedoch zusätzliche Berechnungen durchgeführt werden. 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. Sichtweite innerhalb der Rauchgase) herangezogen werden können. Weiterhin verfügen die meisten Modelle über Ansätze zur Beschreibung einer mechanischen Ventilation.

Neben den genannten Submodellen existieren 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 - 5.6]. Die Entwicklung der Zonenmodelle ist noch nicht abgeschlossen, wird aber zugunsten der Feldmodelle mehr und mehr zurückgestellt.

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

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 Luftsichten 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 so lange 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.

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.

Wie die Beispielrechnungen zeigen, können Zonenmodelle 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 m^2 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.

5.3.4 Feldmodelle (CFD)

Die Ausführungen zu den Grundlagen der Feldmodellierung in diesem Leitfaden beschränken sich auf Brandszenarien, die hinsichtlich der Wärmefreisetzungsraten, der Brandausbreitung sowie der Ausbeute an Verbrennungsprodukten durch entsprechende Anfangs- und Randbedingungen festgelegt (siehe z. B. Kapitel 4, Brandszenarien) sind.

Für die Feldmodelle hat sich in jüngster Zeit auch im deutschsprachigen Raum der Begriff CFD-Modelle (aus dem englischen „Computational Fluid Dynamics“) verbreitet. 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 Feldmodellen 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 sogenannte Erhaltungsgleichungen abgeleitet, welche die zeitliche und räumliche Veränderung elementarer Größen wie z. B. Gastemperatur oder Druck beschreiben, gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren wie Viskosität und Wärmeleitfähigkeit des Rauch-Luft-Gemischs. Im Einzelnen erhält man so Bestimmungsgleichungen für die Gesamtdichte des Gasgemisches, die Strömungsgeschwindigkeit, den Druck sowie die Temperatur. Wärmestrahlung wird entweder unmittelbar durch Erweiterung der Erhaltungsgleichungen um Strahlungskomponenten oder durch die Definition geeigneter Teilbereiche (Flammenzone, Heißgasschichten) und die Berechnung entsprechender geometrischer Einstrahlzahlen behandelt.

Überblicke neueren Datums über Computerprogramme zur Simulation von Raumbränden inklusive Feldmodellen, teilweise auch mit ausführlichen Informationen zu den physikalischen und mathematischen Hintergründen sowie mit praktischen Anwendungsbeispielen findet man z. B. in [5.5, 5.23 - 5.27].

Die in den jeweiligen Bemessungsbrandszenarien enthaltenen Vorgaben zur Brandleistung (Wärmefreisetzungsraten, Brandausbreitungsgeschwindigkeit) und Rauch- und Schadstoffproduktion (Rauchpotential, Ausbeute an Verbrennungsprodukten) werden als Quellterme lokal (d. h. unter Beachtung der Position der jeweiligen Brandquelle innerhalb des räumlichen Umfelds) und gegebenenfalls auch als Funktion der Zeit vorgegeben und finden so unmittelbar Eingang in das zu lösende Gleichungssystem. Der Übergang von einem brandlastgesteuerten zu einem ventilationsgesteuerten Abbrand lässt sich dabei entweder indirekt durch Auswertung der Ventilationsraten oder direkt durch die Analyse der lokalen Sauerstoffkonzentration berechnen. Ein Teil der Modelle verfügt zudem über einfache Verbrennungsmodelle.

Die Gesamtdichte lässt sich in die Teildichten der im Brandraum vorkommenden individuellen gasförmigen Stoffe zerlegen. Das System der hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen wird so durch Gleichungen erweitert, welche den Transport dieser Gaskomponenten durch Auftrieb, Konvektion und Diffusion beschreiben. Besonders wichtig für rechnerische Nachweise sind die Rauchgasbestandteile Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid sowie die sichttrübenden Anteile.

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, so dass 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. Fortschrittlichere Computerprogramme erzeugen das Rechengitter automatisch, nachdem der Anwender grundsätzliche Vorgaben bezüglich der erwünschten Auflösungsgenauigkeit gemacht hat, bieten jedoch auch die Möglichkeit für eine nachträgliche individuelle Optimierung. Auch die Zeitvariable wird diskretisiert. D. h. es werden jeweils die Änderungen des Systemzustandes berechnet, die sich nach einem kleinen Zeitschritt Δt (typischerweise Sekundenbruchteile) ergeben.

Diese räumliche und zeitliche Diskretisierung bedeutet letztlich, dass man die zu lösenden Gleichungen über den endlichen (finiten) Volumenbereich $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ und das endliche Zeitintervall Δt integriert (Finite-Volumen-Methode). Der Konvektionsterm beschreibt dann die Nettobilanz der in den Volumenbereich hinein- bzw. hinausströmenden Beiträge an Masse, Energie oder Impuls. Der Diffusionsbeitrag beschreibt innere molekulare bzw. gegebenenfalls auch turbulente Umwandlungsprozesse und die Quellterme die Erzeugungs- bzw. Umwandlungsprozesse, hervorgerufen durch chemische Reaktionen oder externe Krafteinwirkung. Dies führt also auf ein sehr anschauliches physikalisches Bild, welches auch direkt

benutzt werden kann, um numerische Lösungsalgorithmen zu entwickeln und zu optimieren. Grundlegende Arbeiten zur Entwicklung entsprechender Rechenverfahren wurden von Patankar und Spalding geleistet [5.28]. Der von ihnen entwickelte Lösungsalgorithmus bildet die Grundlage der meisten der derzeit verfügbaren CFD-Computerprogramme im Bereich der Brandmodellierung.

Bild 5.5 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.

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 des Plume wird festgelegt durch die Stärke der Brandquelle, durch bauliche Randbedingungen und die Wechselwirkung mit Raum- oder Ventilationsströmungen. Erreicht der Plume den Deckenbereich, breitert 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 Rauchwälzen ergeben sich konsistent aus der Lösung der lokalen Erhaltungsgleichungen.

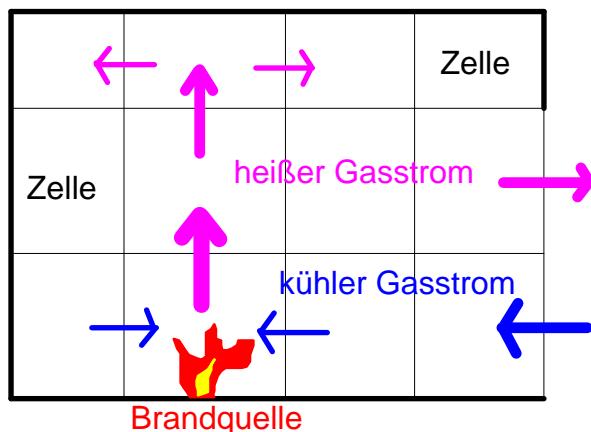


Bild 5.5 Schematische (zweidimensionale) Darstellung der zwischen den Zellen eines Rechengitters ablaufenden physikalischen Prozesse zum Austausch von Energie, Masse und Impuls.

Bei der Betrachtung von Feldmodellen muss man unterscheiden zwischen sogenannten stationären und dynamischen Ansätzen. Bei stationären Modellen sucht man eine Lösung für einen bestimmten vorgegebenen Zeitpunkt, der mit den speziellen Anfangs- und Randbedingungen des Problems verträglich ist. Man erhält dabei keine Information über die dynamische Entwicklung des Systems. Ein solches Modell eignet sich also vor allem für die Beschreibung eines quasi-stationären Zustands, bei welchem sich die relevanten Brand-

Kenngrößen zumindest vorübergehend nicht mehr wesentlich ändern. Stationäre Modelle spielten wegen des geringeren Rechenaufwandes in der Anfangsphase der Feldmodellentwicklung eine wichtige Rolle. Heutzutage werden jedoch überwiegend dynamische Modelle eingesetzt, da man zur Optimierung von Brandschutzmaßnahmen insbesondere an der Entwicklung des Brandgeschehens interessiert ist und ein sich eventuell einstellender quasi-stationärer Zustand automatisch aus der dynamischen Berechnung resultiert. Dynamische Modelle liefern also innerhalb der durch die räumliche und zeitliche Diskretisierung vorgegebenen Auflösung die notwendigen lokalen und zeitabhängigen Informationen über Temperatur, Rauchdichte, Schadstoffkonzentration und Strömungsgeschwindigkeit.

Die räumliche Struktur des Szenariums wird nun durch die Randbedingungen sowie durch die Einführung spezieller Bereiche des Rechengitters festgelegt, die entweder räumlich ausgedehnte Objekte oder grundsätzlich für die Gasströmung unzugängliche Bereiche (man spricht in diesem Zusammenhang auch von blockierten Bereichen des Rechengitters) repräsentieren. Sie beeinflussen die Lösung der Erhaltungsgleichungen durch die entsprechenden Randbedingungen.

Turbulenzeffekte

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, so dass 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. Hinsichtlich der zu verwendenden Gitterauflösung gibt es keine feststehenden Regeln, da sich die Art der Diskretisierung, bzw. der Gleichungsdarstellung erheblich unterscheidet (z. B. zwischen Differenzenverfahren und Finite Elemente Verfahren). Weiterhin steht bei der Brandmodellierung nicht die Untersuchung von kleinskaligen Turbulenzeffekten im Vordergrund, sondern i. A. Wirbel mit größeren Abmessungen als im cm-Bereich. Zur Berücksichtigung dieser Effekte wurden verschiedene Verfahren (Turbulenzmodelle) entwickelt, um bestimmte Einflüsse der Turbulenz auch ohne explizite Berechnung kleinskaliger Wirbel zu berücksichtigen. Das bekannteste Modell stellt das $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell (Beschreibung von Turbulenzeffekten durch zusätzliche Variablen in den hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen) dar, bei dem gemittelte Strömungsgleichungen nach Mittelwerten der Strömungsgrößen gelöst werden.

Bei der „Direkten Numerischen Simulation“ (DNS) wird versucht, ohne Turbulenzmodell auszukommen. Deshalb müssen im Prinzip die kleinsten Wirbel noch räumlich aufgelöst werden, was eine sehr feine Gitterstruktur erzwingt. Da dies die Leistungsfähigkeit heutiger Computer in fast allen Fällen übersteigt, versucht man diesen Ansatz wenigstens näherungsweise mit größeren Gitterweiten umzusetzen.

Bei der „Large Eddy Simulation“ (LES) versucht man, zumindest diejenigen für die Rauch- und Wärmeausbreitung relevanten Wirbel direkt aufzulösen (wie in der DNS). Die Idee hierbei ist, die großskaligen Turbulenzstrukturen, die mit dem gewählten Gitter noch aufgelöst werden können, direkt zu berechnen und die kleinskaligen Strukturen, für die das Gitter zu grob ist, geeignet zu modellieren (Feinstrukturmodell). Kleinere Wirbel werden entweder vernachlässigt oder durch ein Turbulenzmodell näherungsweise berücksichtigt. Da experimentelle Befunde zeigen, dass im Falle der Brandmodellierung die hinsichtlich ihres Energiegehaltes bedeutsamen Wirbel eine räumliche Ausdehnung haben, die der lokalen Plumebreite entspricht [5.30, 5.31], lassen sich diese Methoden mit den derzeit auf Personal Computern möglichen Gitterauflösungen auch für größere Räume einsetzen, sofern – wie hier vorausgesetzt – nicht der Verbrennungsprozess selbst modelliert werden soll.

Weitere gebräuchliche Verfahren zur angenäherten Beschreibung der Turbulenz sind das Eddy-Viskositäts-Modell (Beschreibung von Turbulenzeffekten durch eine erhöhte Viskosität).

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 isotherme 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, so dass 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, so dass in guter Näherung ein Gradient der Geschwindigkeit von Null an der freien Randfläche vorgegeben werden kann. Bild 5.6 verdeutlicht dies an einem Beispiel, welches die mit einem Feldmodell berechneten Strömungsvorgänge in einem Brandraum mit offener Tür in die Umgebung zeigt.

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 Simulationsresultate haben kann.

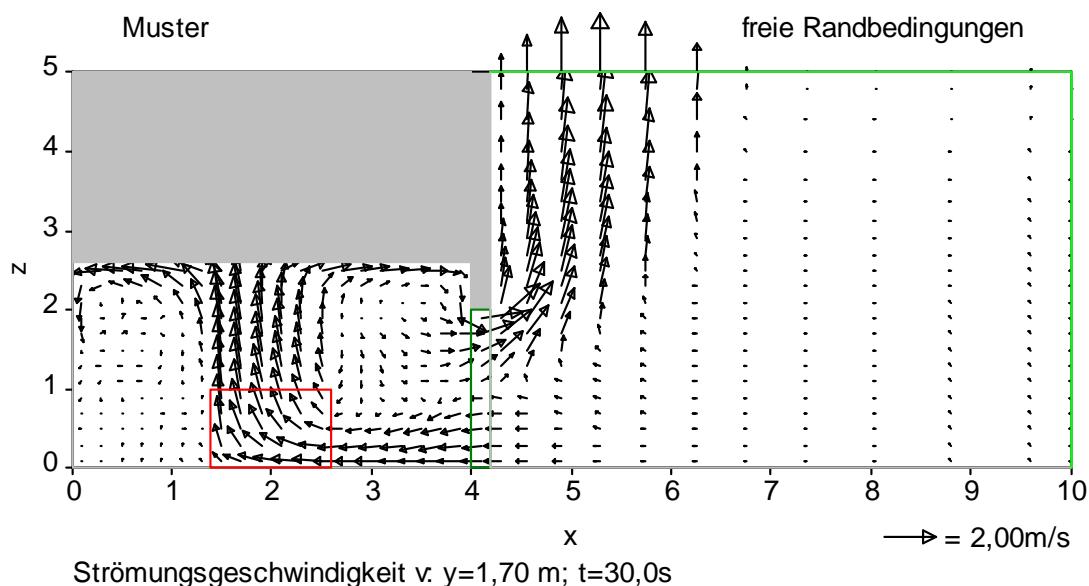


Bild 5.6 Beispiel einer innerhalb des Rechengitters liegenden baulichen Öffnung (CFD-Simulation mit einem Feldmodell). Dargestellt ist ein Längsschnitt durch das dreidimensionale Szenarium in Höhe der Türe des Brandraums.

5.4 Beschreibung der Physikalischen Modelle

5.4.1 Allgemeines

Hinsichtlich der physikalischen Modelle unterscheidet man zwischen Untersuchungen an verkleinerten Modellen und objektspezifischen Versuchen im Maßstab 1:1.

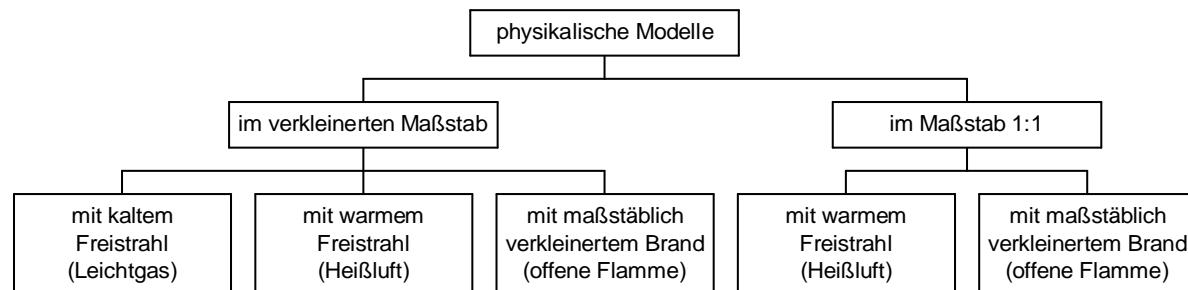
Bei der Darstellung eines Brandgeschehens mit Hilfe eines physikalischen Modells geht es nicht um die Abbildung des Brandes an sich, sondern um die Untersuchung der brandge-

prägten Raumluftströmung 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 Luftfreistrahler 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 Auftriebwirkung das entscheidende Kriterium. Der Exponent der Massenzunahme beim anisothermen Freistrahler über die Wegstrecke wurde mit ca. 5/3 festgestellt [5.39, 5.40]. Dabei zeigten zahlreiche Versuche, dass dies gleichermaßen für Thermikstrahlen geringer wie Thermikstrahlen hoher Übertemperatur gilt [5.41, 5.42, 5.59, 5.60].

Physikalische Modelle können durchgeführt werden durch Nachbildung des Thermikstrahles oder durch maßstäblich verkleinerte Realbrände:



5.4.2 Der Begriff der Ähnlichkeit

Ziel beim Einsatz von physikalischen Modellen ist die anschauliche Visualisierung der Verbrauchung, 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, Wärmeumwandlung 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 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	$Re = \frac{w \cdot L}{\eta/\rho} = \frac{w \cdot L}{v}$	Reynolds-Zahl	Turbulenzerhalten Strömung

5.4.2.1 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 Plumebereich dominierenden Auftriebwirkung.

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; Raumbrände sowie der Brandnahbereich größerer Brände weisen nahezu ausnahmslos ein turbulentes Strömungsverhalten auf.

5.4.2.2 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 5.3: Dimensionslose Kennzahlen aus dem Bereich der Energie und ihre Bedeutung

Bedeutung der Kräfte	Quotient	Name	Anwendung
$\frac{\text{Auftrieb}}{\text{Trägheit}} \cdot \left(\frac{\text{Trägheit}}{\text{Reibung}} \right)^2$	$\text{Gr} = \frac{g \cdot L^3}{v^2} \cdot \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho}$ $\text{Gr} = \frac{g \cdot L^3}{v^2} \cdot \frac{T - T_\infty}{T_\infty}$	Grashof-Zahl	Freie Konvektionsströmung an Flächen
Zähigkeit : Temperaturleitfähigkeit	$\text{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$	Prandtl-Zahl	Freie und erzwungene Konvektion
Transp. Wärmemenge : Wärmeableitung	$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	Nusselt-Zahl	Erzwungene Konvektion

5.4.3 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 Freistrahlen) 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

5 Modelle für die Brandsimulation

in einer anderen Plumehöhe, mit anderer Aufweitung und anderen Spitzenwerten. Die Abnahme des auf der Plumeachse angesiedelten Maximalwertes geschieht entsprechend [5.52]

$$\text{Temperaturerhöhung: } \Delta T \sim \dot{Q}^{2/3} \cdot h^{-5/3} \quad (5.7)$$

$$\text{Geschwindigkeit: } w \sim \dot{Q}^{1/3} \cdot h^{-1/3}. \quad (5.8)$$

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 (den „Längenmaßstab“)

$M_L = \frac{L^*}{L}$ ausdrücken (Gl. 5.9):

$$M_{\Delta T} = \frac{\Delta T^*}{\Delta T} = \left(\frac{Q^*}{Q} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{h}{h^*} \right)^{5/3} = M_Q^{2/3} \cdot M_L^{-5/3}. \quad (5.9)$$

Analog lässt sich mit den Geschwindigkeiten verfahren, wobei sich die Beziehung

$$M_w = \frac{w^*}{w} = \left(\frac{Q^*}{Q} \cdot \frac{h}{h^*} \right)^{1/3} = \left(\frac{M_Q}{M_L} \right)^{1/3} \quad (5.10)$$

ableitet. Gleichwohl gilt

$$M_w = \frac{w^*}{w} = \frac{h^*}{t^*} \cdot \frac{t}{h} = \frac{h^*}{h} \cdot \frac{t}{t^*} = \frac{M_L}{M_t}, \quad (5.11)$$

was zu einem „Zeitmaßstab“ M_t für Abbildungen bzgl. des thermischen Plumes führt:

$$M_t = M_Q^{-1/3} \cdot M_L^{4/3}. \quad (5.12)$$

Bei der Abbildung des brandbedingten Verrauchungsgeschehens im physikalischen 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)

Wegen Gl. 5.9 und Gl. 5.10, welche aus Gl. 5.7 und Gl. 5.8 folgen, gilt für den thermischen Plume eines Brandes immer

$$M_{Ar} = M_Q^{\frac{2}{3}} \cdot M_L^{-\frac{2}{3}} \cdot M_L^{\frac{2}{3}} \cdot M_Q^{-\frac{2}{3}} = 1, \quad (5.13)$$

was bedeutet, dass die Archimedeszahl für alle lokalen Brände eine Konstante ist [5.44, 5.61].

5.4.4 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 Energiefreisetzung 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 Gl. 5.7 und Gl. 5.8 ff gelingt auch die Zuordnung zu einer diesem Modellbrand äquivalenten Energiefreisetzung 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 (Tabelle 9) in [5.44] hingewiesen.

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.

5.4.5 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 60er und 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts lagen [5.53, 5.55], ist nachgewiesen, dass bei freien, turbulenten Strömungen die Re-Zahl von untergeordnetem Einfluss bleibt, so dass vor allem die den Strömungsvorgang (Antrieb) beschreibenden Größen A_r und an der Systemgrenze E_u einzuhalten sind. Dabei ist es eine notwendige 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 Entrauchungsmaßnahmen führen [5.46].

Tabelle 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

Eine Ausnahme bildet die Strömungssituation bei der Gebäudeaerodynamik, da durch Ablöseeffekte an scharfkantigen Gebäudemodellen die Gesamtströmung im Windkanal als aus-

gebildet turbulent betrachtet werden kann und keine großen Temperaturunterschiede zu beachten sind [5.45, 5.47].

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 Spuren-gasmethode quantifiziert werden. Bei Brandversuchen an verkleinerten Modellen kann die Rauchausbreitung zusätzlich mittels Temperaturmessung überprüft werden.

5.4.6 Besonderheiten bei einzelnen Modelltypen

Im folgenden sollen einige Besonderheiten einzelner Modelltypen diskutiert werden. Zu den Modelltypen mit Heißluftstrahl und Leichtgas siehe Abschnitt 5.4.1 und 5.4.4 sowie folgende Literaturangaben [5.62, 5.67, 5.68].

5.4.6.1 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 Energiefreisetzung des Modellbrandes wegen $M_{\Delta T} = 1$ (s. Gl. 5.7) gemäß

$$M_Q = M_L^{5/2} \quad (5.14)$$

zum Längenmaßstab des Modells skaliert werden.

Wird die abbildende Energiefreisetzung gemäß Gl. 5.14 vorgegeben, so folgt direkt aus dem Modellmaßstab (Längenmaßstab) der Maßstab für die Zeit und folgerichtig diejenigen für Geschwindigkeit und Volumenströme [5.44]

$$M_t = M_L^{1/2} \quad (5.15)$$

$$M_w = M_L^{1/2} \quad (5.16)$$

$$M_v = M_L^{5/2} \quad (5.17)$$

Speziell für den kleinskaligen niederenergetischen Brand mit Einhaltung der Temperaturerhöhung im thermischen Plume sind weitreichende Parallelen zum großen Brandgeschehen herzustellen. Dazu sind Längenmaßstäbe unter 1:10 (besser 1:5 und kleiner) einzuhalten, da

gerade 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 eingehalten 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.

5.4.6.2 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 realistischen 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 Abnahmever suchen 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. Zuluftöffnungen, 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, Sonnenschutzeinrichtungen) müssen vorhanden sein oder strömungstechnisch sorgfältig nachgebildet werden.
- Raumlufttechnische 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 Abnahmever suchen stehen folgende Verfahren zur Verfügung:

- Erwärmte Luft (bis ca. 150 kW Wärmefreisetzung)

- Erwärmte Luft (bis ca. 1,5 MW Wärmefreisetzung mit Gasbrennern bzw. Lachenbändern)

Bei der Extrapolation auf Brände mit höherer Wärmefreisetzung sind die Übertragungsfunktionen aus der Ähnlichkeitslehre der Strömungsmechanik anzuwenden [5.44].

5.4.6.3 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

$$Je = \frac{h}{z_0} \quad (5.18)$$

mit h = Gebäudehöhe und z_0 = Rauigkeitsparameter.

Zur Modellierung von atmosphärischen Windströmungen im Windkanal sei auf das Merkblatt der Windtechnologischen Gesellschaft (WtG) [5.47] verwiesen.

5.4.7 Durchgeführte Originalbrandversuche und ihre Modellierung

Zur Validierung der physikalischen Modelle wurden in einem Brandhaus Originalversuche durchgeführt, die mit den Ergebnissen anderer Methoden (Brandsimulationsmodelle) verglichen worden sind. Im Rahmen der Erstellung des Leitfadens wurden hierzu folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Originalbrandversuche in einem atriumähnlichen Raum ($L \times B \times H$) ($8,2 \times 6,2 \times 10,0$ m) und einem an das Atrium angrenzenden Raum ($L \times B \times H$) ($5,3 \times 4,0 \times 2,6$ m) mit einer Brandleistung von ca. 4 MW,
- CFD-Modelle (FDS, KOBRA-3D, CFX, FLUENT),
- Zonenmodell (MRFC),
- Physikalische Modelle im Maßstab 1:4, 1:5, 1:10 und 1:20.

Die wesentlichen Ergebnisse sind in den Tabellen 5.5 und 5.6 dargestellt. Die Rechnungen bzw. Modellversuche sollten für beide Brandversuche (jeweils Isopropanol in Brandwannen mit 2,4 m² Gesamtfläche) mit einer vor der Versuchsdurchführung auf der Grundlage von Abschätzungen festgelegten konstanten Wärmefreisetzungsraten von 3.590 kW durchgeführt werden.

Tabelle 5.5 beschreibt den Brand in dem atriumähnlichen Raum mit geschlossener Verbindung zum Nebenraum. Dargestellt sind Modellergebnisse und Messungen für einen Zeitpunkt ca. 8 Minuten nach Zündung der Brandquelle (innerhalb der nahezu stationären Phase der Brandentwicklung). Unter Berücksichtigung der Unterschiede zwischen vorgegebener und gemessener mittlerer Brandleistung ergibt sich für die CFD-Modelle und physikalischen Modelle sowohl im Vergleich untereinander als auch im Vergleich mit dem Experiment eine gute Übereinstimmung. Größere Abweichungen bei der Berechnung der Dicke der raucharmen Schicht ergeben sich für das Zonenmodell, da sich bei diesem Versuchsaufbau der Plume direkt im Zuluftstrom befand und sich so durch eine starke Plumeneigung und entsprechender Verwirbelung keine eindeutige Schichtbildung einstellte [5.69].

Tabelle 5.6 beschreibt den Brand im kleineren Nebenraum mit Verbindung zum atriumähnlichen Hauptraum. Bei diesem Versuch ergab sich 2 - 3 Minuten nach der Zündung ein Übergang von der brandlastgesteuerten zur ventilationsgesteuerten Verbrennung, erkennbar an den aus der Öffnung des Brandraums in den atriumähnlichen Nachbarraum schlagenden Flammen. Da außerdem bei diesem Versuch aufgrund der hohen Temperaturen im Brandraum die Strahlungsrückkopplung auf die Brandquelle eine große Rolle spielt (erkennbar an der deutlich höheren mittleren Brandleistung und des entsprechend schnelleren Abbrands des vorhandenen Brennmaterials) ist dieser Versuch für einen Vergleich zwischen physikalischen Modellen und Rechenmodellen nur mit zusätzlichen analytischen Ansätzen verwendbar.

5.4.8 Zusammenfassung

Die physikalischen 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 Feldmodellen – erst in der Ebene oberhalb der Flammenspitzen zu beginnen ist (Flammenspitzen müssen grundsätzlich unterhalb der Rauchgasschicht liegen). Beim maßstäblich verkleinerten Brand gemäß 5.4.6.1 wird die Verbrennungszone näherungsweise modelliert.

Die Wärmeabgabe an Bauteile wird bei den physikalischen Modellen nicht der Realität entsprechend abgebildet – sie sind deshalb zu Bauteiltemperaturbestimmung nicht geeignet! Die durchgeführten Modelluntersuchungen und -vergleiche mit physikalischen Modellen, Zonen- und Feldmodellen sowie Originalbrandversuchen zeigten dennoch hinsichtlich der Rauchgasströmungen, -temperaturen und -schichtungen für die untersuchten Szenarien eine relativ gute Übereinstimmung.

Die Hauptvorteile der physikalischen 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).

5 Modelle für die Brandsimulation

Tabelle 5.5 Ergebnisvergleich der verschiedenen Modelluntersuchungen zum Originalbrandversuch „Brand im Atrium“
 (Versuch Nr. 4 am 22.05.2003 bei der MFPA Leipzig)

		KOBRA 3D	CFX	FLUENT	FDS	MRFC	phys. M. Imtech	phys. M. IfI	phys. M. BCL	Original- versuch
Brandleistung [kW]	3.590	3.590	3.240	4.500	3.590	3.590*)	3.170*)	66,4	3.167	
Strahlungsanteil [%]	20	20	20	20	20					
Temperatur in Schlot 1 [°C]	160	140	139	180	250	159	125	155	140	
Temperatur in Schlot 2 [°C]	170	133	140	180	250	158	125	165	160	
Strömungsgeschwindigkeit in Schlot 1 [m/s]	4-7	4,7	5,3	5,9	6,0	5,2	4,2	5,0-6,0*)	5,5	
Strömungsgeschwindigkeit in Schlot 2 [m/s]	4-7	4,2	5,6	6,2	6,0	3,8	4,2	5,0-6,0*)	5,5	
Dicke der raucharmen Schicht [m]	0-2,0	1,5-2,0	0-2,0	0-4,0	5,0	1,5-2,0	1,5		ca. 2,0 **)	
Rauchgastemperatur [°C]	185	140	130	180	220	140	120		180	
Zuluftgeschwindigkeit [m/s]		3,1	2,9	3,5		3,1		3,4*)	3,0	
CO ₂ -Konzentration [Vol.-%]	0,8		3,2	0,9	1,0				1,0	
Modellmaßstab						1:4	1:20	1:5	1:1	

*) Umrechnung vom Modell

**) Die Angabe bezieht sich auf die Lage in Tornähe (Zuluftöffnung mit 2 m Höhe); ansonsten unterlag sie größeren Schwankungen

Tabelle 5.6 Ergebnisvergleich der verschiedenen Modelluntersuchungen zum Originalbrandversuch „Brand in einem an das Atrium angrenzenden Raum“
(Versuch Nr. 2 am 22.05.2003 bei der MFPA Leipzig)

		CFX	FDS	MRFC	phys. Modell Imtech	phys. M. IfI	Original- versuch
Brdaleistung [kW]		3.590	4.500	3.590	3.590*)	4.400	3.590*)
Strahlungsanteil [%]		20	20	20			
Temperatur in Schlot 1 [°C]		122	130	120	113	161	200
Temperatur in Schlot 2 [°C]		176	110	120	120	168	150
Strömungsgeschwindigkeit in Schlot 1 [m/s]		2,6	4,5	6,0	3,3**)	3,5	5,5
Strömungsgeschwindigkeit in Schlot 2 [m/s]		4,4	3,5	6,0	4,8**)	4,7	5,5
Dicke der raucharmen Schicht [m]		6,8	6,0	5,8	6,8-7,0	6,0	6,0
Temperatur im Brandraum [°C]			800	800			800
Rauchgastemperatur [°C]		125	110	120	115	150	160
Zuluftgeschwindigkeit [m/s]		2,2	2,3		2,6	2,1	2,6
CO ₂ -Konzentration [Vol.-%]			1,4	1,2			1,8
Modellmaßstab					1:4	1:4	1:15
							1:1

Anmerkung: Die angegebenen Werte beziehen sich bis auf die Brandleistung und die Brandraumtemperatur auf das Atrium.

*) Umrechnung vom Modell

**) nur ein Messpunkt in Schlotmitte

5.5 Kriterien für die Modellbewertung

5.5.1 Allgemeines

Aufgrund der Bedeutung der zur Anwendung kommenden Nachweisverfahren (Handrechnungen, Computersimulationen, physikalische Modelle) ist eine Qualitätskontrolle der Ergebnisse 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 in Brandschutz gültig [5.74, 5.75]. Die Bewertung der Programme erfolgt dabei methodisch durch drei Schritte, die hier gemäß den Angaben in [5.74] 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. 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. Diese Verifizierung kann vom Anwender i.a. nicht geleistet werden. Hier ist es von Vorteil, wenn dies vom Programmentwickler oder einer von einem national oder international organisierten Anwenderkreis durchgeführt wird.

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 beinhaltet. Wie bereits geschildert, ist es günstig, wenn das Modell bereits durch einen großen Anwenderkreis genutzt wird.

5 Modelle für die Brandsimulation

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 Szenariums für das entsprechende Rechenmodell.
- Simulation und Plausibilitätsbetrachtungen der Rechenergebnisse.
- Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Experiment.
- Bewertung der Vergleiche (numerische Abweichung)
- Diskussion möglicher Ursachen für etwaige Abweichungen.

Sind die Versuchsdaten untersucht, wird anhand der bekannten Geometrie, Lüftung und des Abbrandverhaltens eine Abbildung der Versuchsrandbedingungen in ein Modell für die numerische Simulation erstellt. In der Regel liegen dafür nicht alle notwendigen Werte vor. Genauso bei den Quelltermen, d. h. bei den Abbrandraten, sind die Angaben in der Regel für eine Simulationsvorgabe nicht ausreichend. Auch die Randbedingungen der Versuche erlauben in der Regel keine absolut vollständige Modellierung. Liegen somit unbestimmte Randbedingungen und Quelldaten vor, dann kann die Modellierung eines Versuches im Allgemeinen nicht mit nur mit einem einzigen Datensatz erfolgen, sondern es muss eine Parameterstudie durchgeführt werden, wobei die unbekannten bzw. unsicheren Randbedingungen zu variieren sind.

Die Modellierung sollte dem realen Szenarium bezüglich Geometrie und den Dimension 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 Naturbränden mit Mischbrandlasten), dann sind die Versuchsdaten u. U. durch bekannte Zusammenhänge zu ergänzen (z. B. hinsichtlich flächenspezifischer Wärmefreisetzungsraten oder Abbrandrate).

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

Im nächsten Schritt werden die Rechenergebnisse mit den Ergebnissen des Experiments verglichen. Diesem Vergleich kann eine Prüfung auf Plausibilität der Rechenergebnisse vorausgehen, im Allgemeinen erübriggt sich aber dieser Schritt wegen des unmittelbaren Ver-

gleichs mit den experimentellen Daten. Je mehr Werte unmittelbar verglichen werden können, umso besser kann die Verifikation 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 Heißgasttemperatur in Zonenmodellen und einer Messstelle im Versuch angeführt. Die errechnete Heißgasttemperatur des Zonenmodells entspricht einer integralen Gasschichttemperatur, während das Messergebnis je nach Art des Sensors einen lokalen Wärmeübergang in den Temperaturfühler durch Konvektions- und Strahlungsenergie an einem Raumpunkt wiedergibt.

Die Ergebnisse sind auch hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklungen zu untersuchen.

Anhand der Vergleiche so gewonnener Gegenüberstellungen von Mess- und Simulationsergebnissen kann nun die Verifikation vorgenommen werden. In die Verifikation gehen folgende Größen ein:

1. Erfassung der Effekte im Brandgeschehen (z. B. Einfluss der Ventilation und der Energiefreisetzung), also ein qualitativer Vergleich der zeitlichen Entwicklungen der untersuchten Größen.
2. Quantitativer Vergleich der Messergebnisse: Hier ist besonderes zu beachten, dass die quantitative Vergleichbarkeit zweier Werte auch wirklich gegeben ist.

Für eine erfolgreiche Verifikation muss das Rechenmodell Kriterium 1 immer erfüllen. Beim Kriterium 2 ist eine vollständige Umsetzung nicht immer möglich, da Daten aus Versuchen nicht immer unmittelbare Entsprechungen in den Rechenergebnisse finden. Ein Beispiel stellen Temperaturvergleiche dar, die oftmals als einzige, zumindest aber als wesentliche Verifikationsgrundlage verwendet werden. Hier ist sicherzustellen, dass sich die errechneten Werte mit den gemessenen Werten vergleichen lassen. Dies kann bei einem Vergleich mit den Ergebnissen eines Zonenmodells 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.

5 Modelle für die Brandsimulation

Wenn möglich, sollte die Verifikation 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.

5.5.2 Typische Anwendungsfälle und Vergleichsrechnungen

5.5.2.1 Plume-Temperatur und Ceiling-Jet

Im Folgenden werden die in Anhang 5.2 angegebenen Gleichungen eingesetzt, um die Deckentemperaturen über dem Brandherd bei Poolbrandversuchen mit Spiritus zu bestimmen. Dabei handelt es sich um Versuche, die in einem Brandofen mit ca. 40 m^2 Grundfläche und einer lichten Raumhöhe von ca. 6,20 m durchgeführt wurden [5.18]. Bei den dort

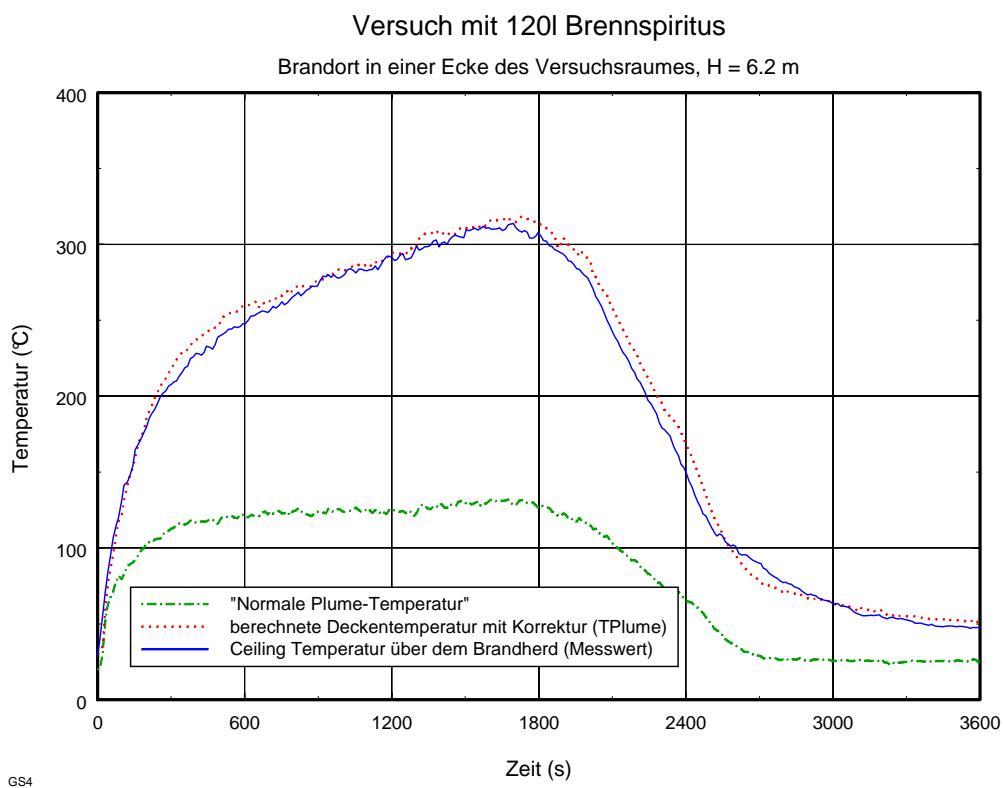


Bild 5.7 Gemessene und berechnete Deckentemperatur bei einem Poolbrand mit ca. 1 MW Brandleistung; Eckenposition des Brandherdes [5.19]

durchgeführten Versuchen wurde die Größe des Spiritus-Pools und damit die Energiefreisetzungsrates und die Lage des Pools im Brandofen 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.

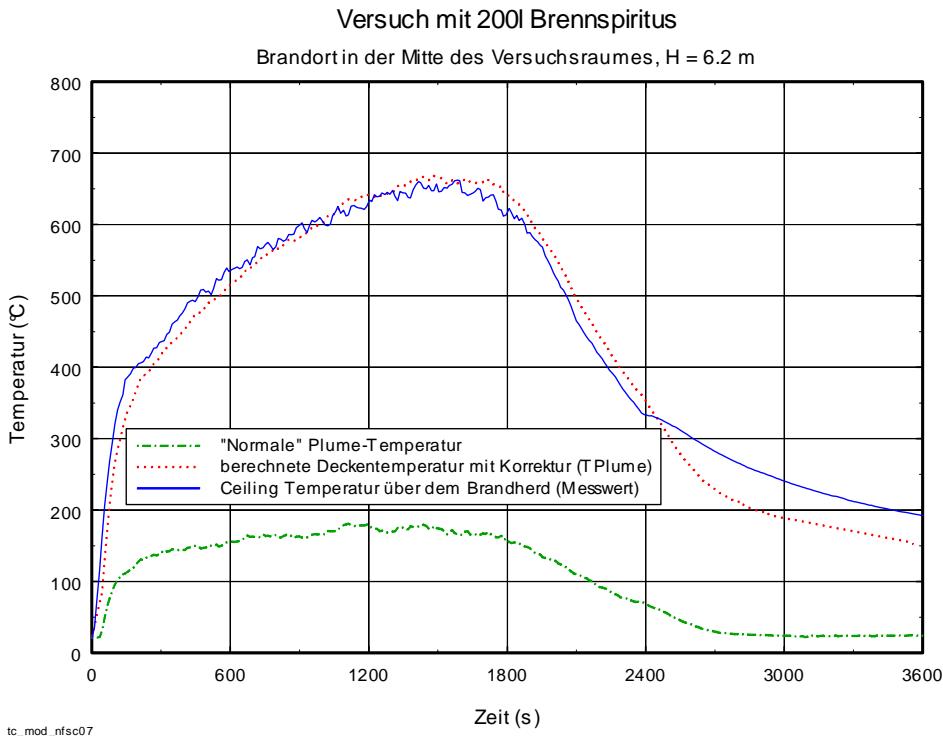


Bild 5.8 Gemessene und berechnete Deckentemperatur bei einem Poolbrand mit ca. 1,8 MW Brandleistung; Brandherd in der Mitte des Brandofens [5.15]

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 5.7 und 5.8 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen [5.19]. Dabei sind die rechenwerte ohne Berücksichtigung der Korrektur als „normale“ Temperatur gekennzeichnet.

Weitere Vergleiche der nach den Gleichungen (5.33) bis (5.40) berechneten Temperaturen mit den Messwerten aus Großbrandversuchen [5.17] ergeben, dass der obige Ansatz die Versuchswerte gut annähert (Tabelle 5.4).

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. 3500 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 Rauchgastemperatur 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 Wärmefreisetzungsraten anzugeben. Dieser effektive Heizwert wurde anhand von Versuchen aus dem Cone-Calorimeter zu 12 MJ/kg bestimmt. Das

5 Modelle für die Brandsimulation

Bild 5.9 gibt nunmehr den Vergleich der gemessenen Temperaturwerte mit den berechneten Temperaturwerten wieder. Auch hier wurden die Formeln entsprechend Anhang 5.2 verwendet. Obwohl die für die Berechnung angenommene Wärmefreisetzungsraten hierbei mit Fehlern behaftet ist, zeigt sich doch eine bemerkenswert gute Übereinstimmung.

Tabelle 5.4 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

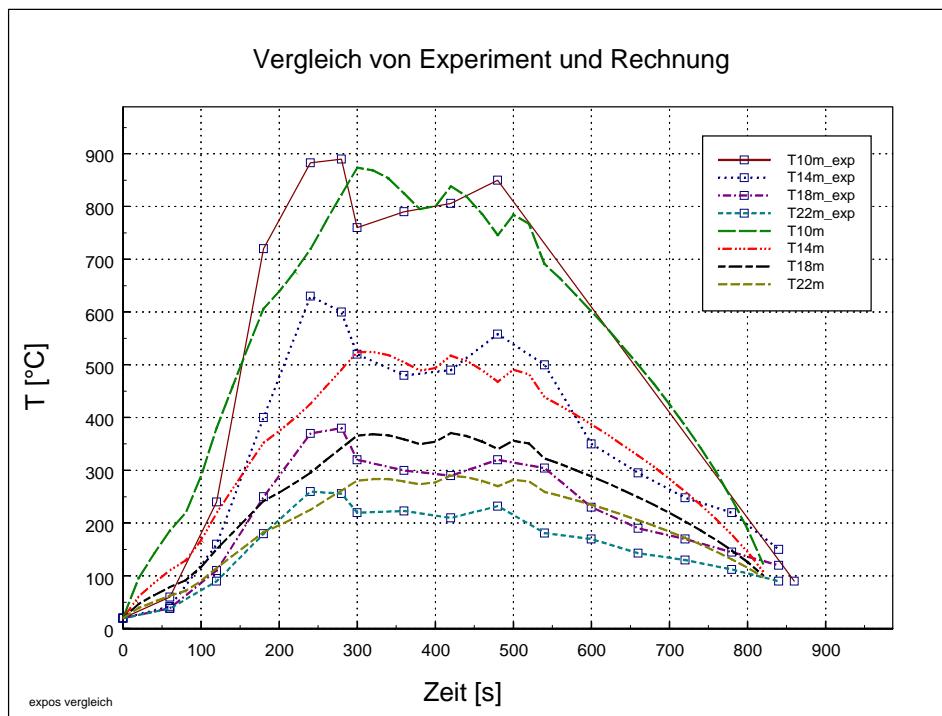


Bild 5.9 Vergleich der Temperaturentwicklung in verschiedenen Höhen oberhalb des Brandherds im Experiment und nach Berechnung

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 5.4) selbst Mittelwerte über ein bestimmtes Messintervall darstellen, wobei die auftretenden Schwankungen auf die turbulente Struktur der Strömung im Plumebereich 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.

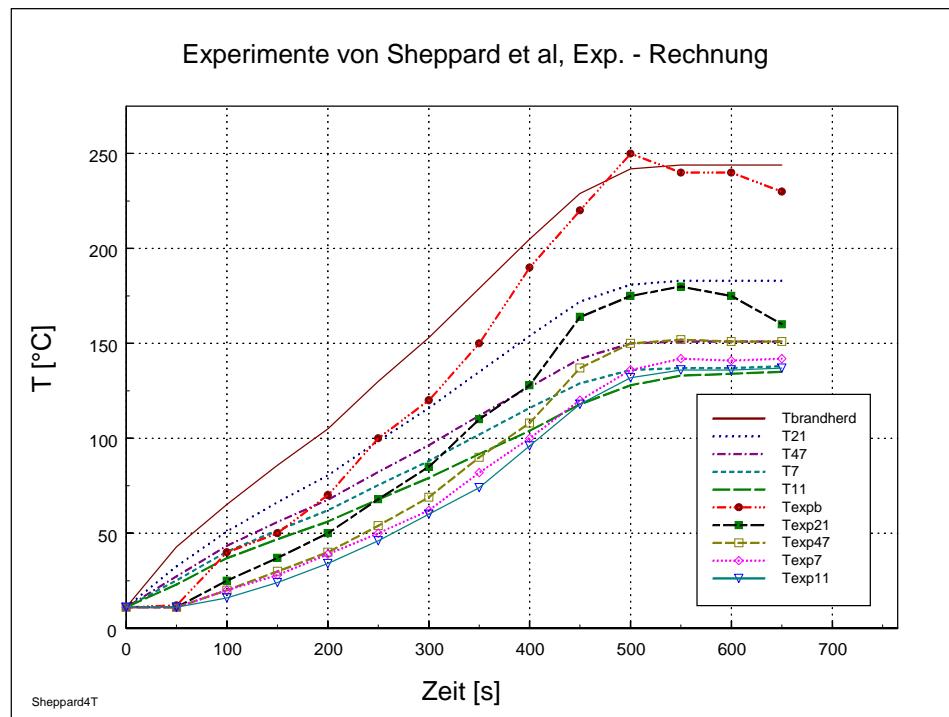


Bild 5.10 Vergleich der Temperaturentwicklungen im Experiment und nach Berechnung in verschiedenen Entfernungen zum Brandort (2,1 m, 4,7 m, 7 m und 11 m)

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 eine 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 Wärmefreisetzungsraten 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 5.10) dargestellten Zahlen zum Ausdruck.

Die exakten Randbedingungen für die hier vorgestellten sind jeweils aus der angegebenen Literatur zu entnehmen.

5.5.2.2 Beispiele und Experimente für Vergleichsrechnungen

Für die Bewertung von Modellen sind einerseits geeignete Experimente und andererseits geeignete Beispiele für vergleichende Berechnungen notwendig. Dabei ergibt sich die Notwendigkeit der letzten Kategorie im Wesentlichen aus der beschränkten Anzahl an geeigneten Experimenten. Hinsichtlich der Experimente lassen sich leicht hohe Anforderungen hinsichtlich des Umfangs der Messergebnisse und der Reproduzierbarkeit formulieren, d. h. die dafür idealen Experimente beschreiben. Bedauerlicherweise stehen solche Experimente, wenn überhaupt, dann nur in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung. Oftmals steht nur eine eingeschränkte Auswahl an Messergebnissen zum Vergleich zur Verfügung. 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.

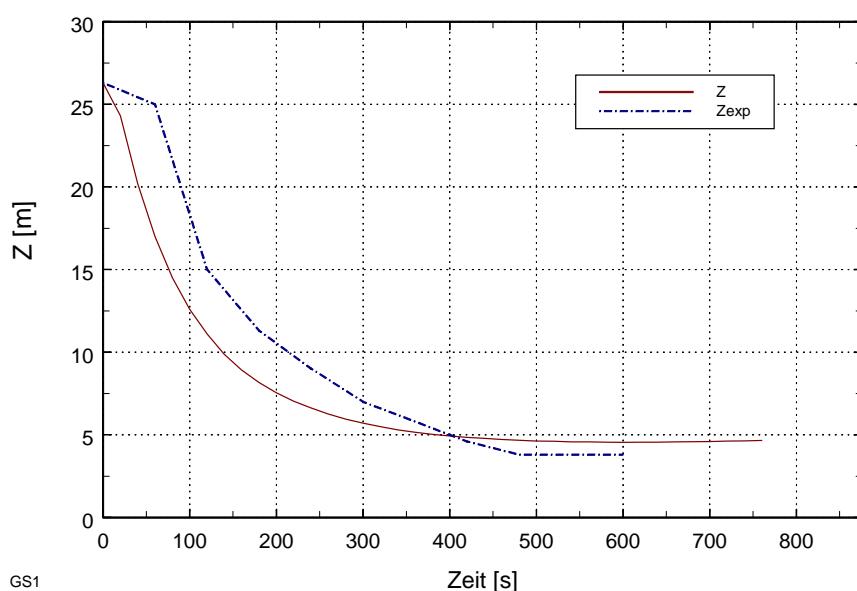


Bild 5.11 Vergleich der rauchgasfreien Schicht im Experiment und nach Berechnung

Für die Bewertung von Atrien oder Hallen wurden zwei Brandexperimente ausgewählt. Das erste fand in einem Atrium mit den Abmessungen ($L \times B \times H$) $30\text{ m} \times 24\text{ m} \times 26,3\text{ m}$ statt, bei dem ein Poolbrand eine Brandleistung von $1,3\text{ MW}$ erzeugte [5.32]. Die Zuluftfläche betrug $3,2\text{ m}^2$ und die RWA-Fläche in den seitlichen Umfassungswänden $6,4\text{ m}^2$. Die Messungen bei diesem Brandversuch waren sehr umfangreich, so dass die Werte für Temperatur und rauchgasfreie Schicht in guter Genauigkeit vorliegen. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung sind in den Bildern 5.11 und 5.12 dargestellt. Daraus folgt, dass die experimentellen Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben werden und die dargestellten Differenzen die Fehlerbandbreite markieren.

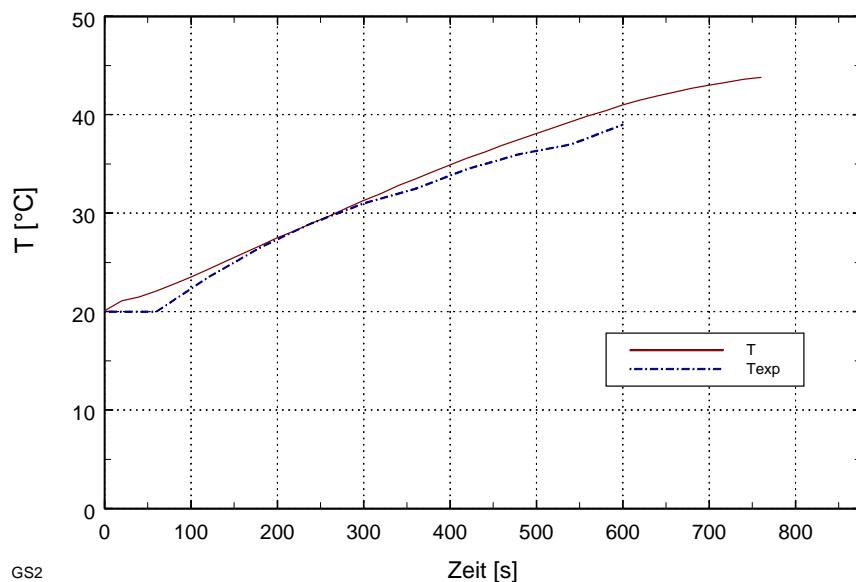


Bild 5.12 Vergleich der mittleren Rauchgastemperatur im Experiment und nach Berechnung

Das zweite Experiment fand in einem Flugzeughangar statt ($90\text{ m} \times 54,2\text{ m} \times 15\text{ m}$, $L \times B \times H$) [5.33], bei dem zwei unterschiedliche Brandverläufe untersucht wurden. Innerhalb dieses Raums erfolgte die Abtrennung eines Areals durch Rauchschürzen ($20\text{ m} \times 21\text{ m}$), die bis auf eine Höhe von 12 m herabreichten. Aufgrund der leichten Dachwölbung entstand dadurch ein Rauchreservoir von $2,5\text{ m} - 3\text{ m}$ Höhe. Die Zuluftfläche bei diesen Experimenten betrug 16 m^2 und die Rauchabzugsfläche im Dach 68 m^2 . Dabei waren folgende Ergebnisse zu verzeichnen:

Sz. 1 (4 MW): Temperatur $50\text{ °C} - 55\text{ °C}$,

Sz. 2 (36 MW): Temperatur $165\text{ °C} - 180\text{ °C}$.

Leider erfolgte keine exakte Bestimmung der rauchgasfreien Schicht, die Beobachtung ergab jedoch, dass in beiden Fällen die Rauchgase innerhalb des Reservoirs verblieben. Die mit CFAST berechneten Werte sind in den Bildern 5.13 und 5.14 dargestellt.

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 rauchgasfreie

5 Modelle für die Brandsimulation

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 akzeptable Ergebnisse liefern.

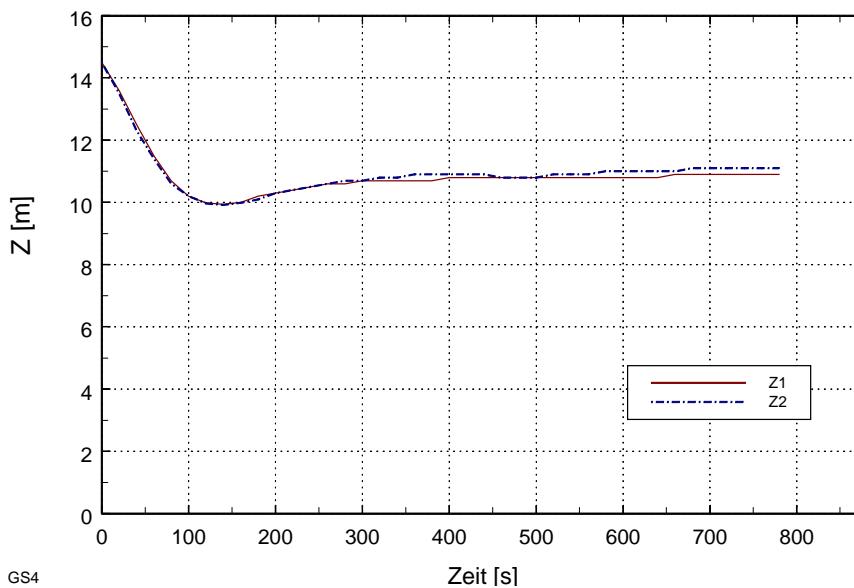


Bild 5.13 Dicke der rauchgasfreien Schicht nach Berechnung für die beiden Brandsszenarien (4 MW und 36 MW)

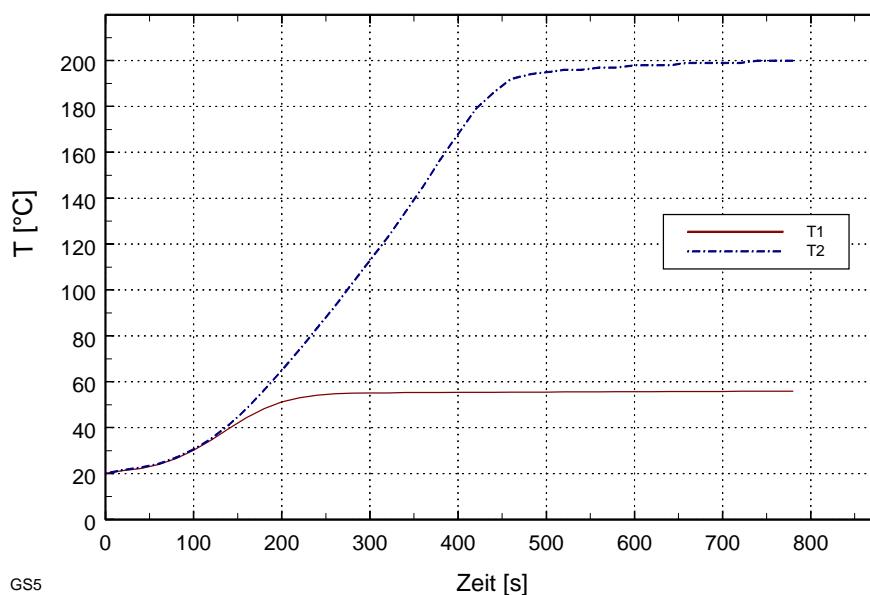


Bild 5.14 Mittlere Rauchgastemperatur nach Berechnung für die beiden Brandsszenarien (4 MW und 36 MW)

Andererseits stoßen alle Modelle an Anwendungsgrenzen. Bei der Eingrenzung dieser Fälle steht man erst am Anfang. Nach bestehender Erfahrung werden die Anwendungsgrenzen

von Zonenmodellen 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 Zulufteinflüsse oder sonstige dominierende Strömungen überwiegen. Für eine ausführliche Diskussion der Einschränkungen kann hier auf die entsprechenden Kapitel des Technical Reference Guide des Zonenmodells CFAST [5.72] 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 [5.72]. 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.

Das erste Beispiel behandelt den Fall von Zulufteinflüssen. Hier lag die Rauchgasschicht im Bereich der Zuluftöffnungen, so dass 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 vom Feldmodell vorhergesagt wurden. Dies ist durch die Bilder 5.15 und 5.16 dokumentiert. Die dargestellten Ergebnisse korrespondierten mit den durchgeführten Rauchversuchen.

Es wurden folgende Randbedingungen untersucht:

Das Bürgeschoss 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.

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 m^2 . Die Gesamtleistung der Absauganlage beträgt im 1. Fall ca. $75.000 \text{ m}^3/\text{h}$, im 2. Fall $150.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Es wird der Brand einer Büroeinrichtung unterstellt, der sich 5 Minuten lang ungehindert ausbreitet bevor die Sprinkleranlage aktiviert wird und die weitere Ausbreitung des Feuer beendet. Es wird konservativ angenommen, dass die Energiefreisetzungsraten / Abbrandrate bis zur manuellen Löschung des Feuers konstant bleibt. Die maximale Energiefreisetzungsraten beträgt 1,2 MW. Der Brandherd hat eine Fläche von 2 m^2 und befindet sich im Abstand von 5 m vom linken Ende des Brandraums auf der Längsachse.

5 Modelle für die Brandsimulation

Die Brandsimulation erfolgte mit dem Computational-Fluid-Dynamics (CFD) – Programm Fire Dynamics Simulator FDS (Version 2) vom NIST, USA [5.20, 5.21].

Im 1. Fall ist aufgrund der geringeren Absaugleistung die Verwirbelung weniger stark, so dass 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.

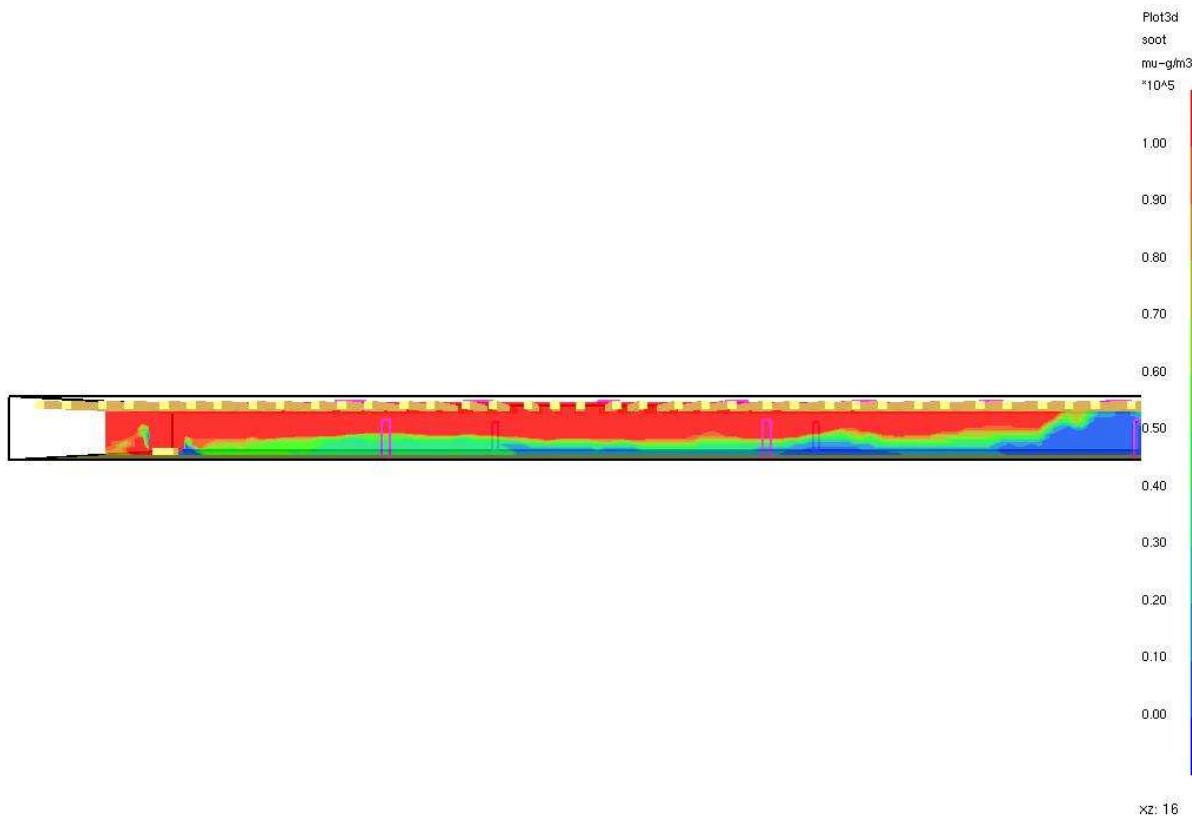


Bild 5.15 Rußkonzentration in der mittleren Längsebene nach 600 s, Leistung der maschinellen Abluft ca. 75.000 m³/h

Bild 5.17 zeigt die entsprechenden Ergebnisse, die mit einem Zonenmodell 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.

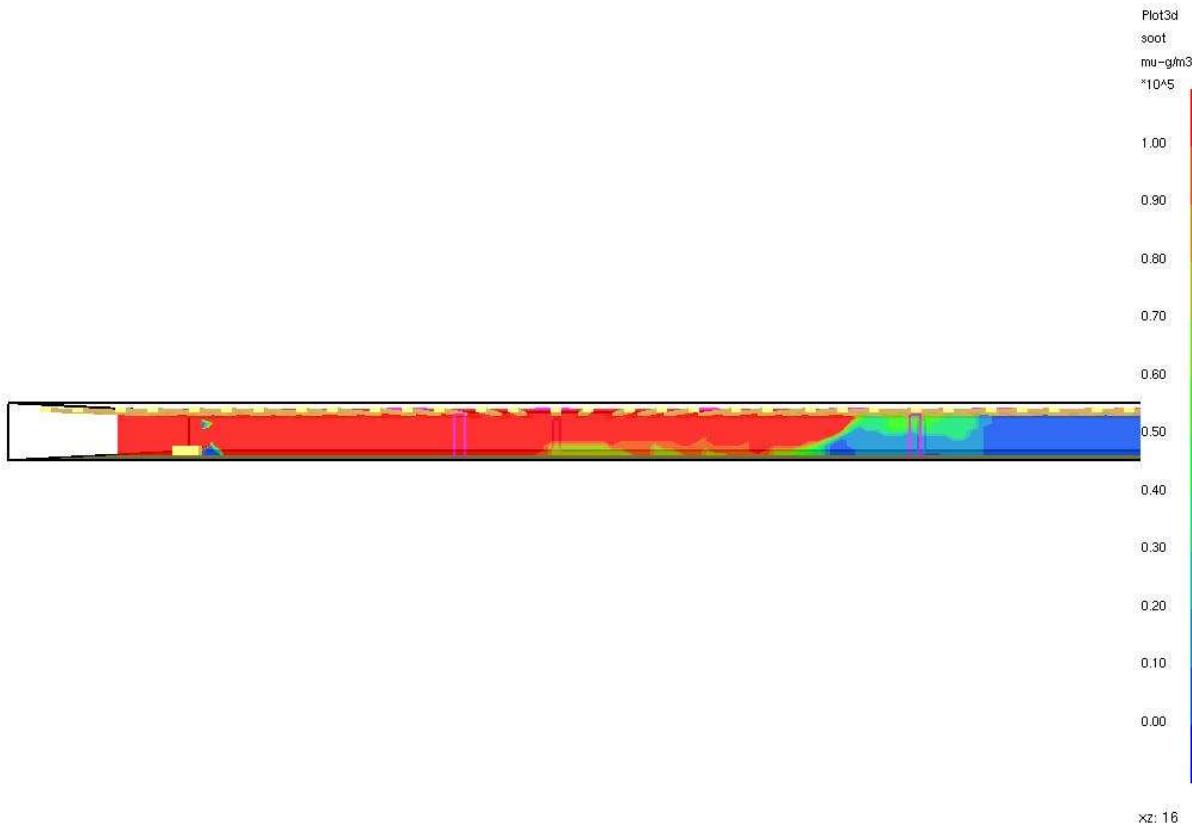


Bild 5.16 Rußkonzentration in der mittleren Längsebene nach 600 s, Leistung der maschinellen Abluft ca. 150.000 m^3/h

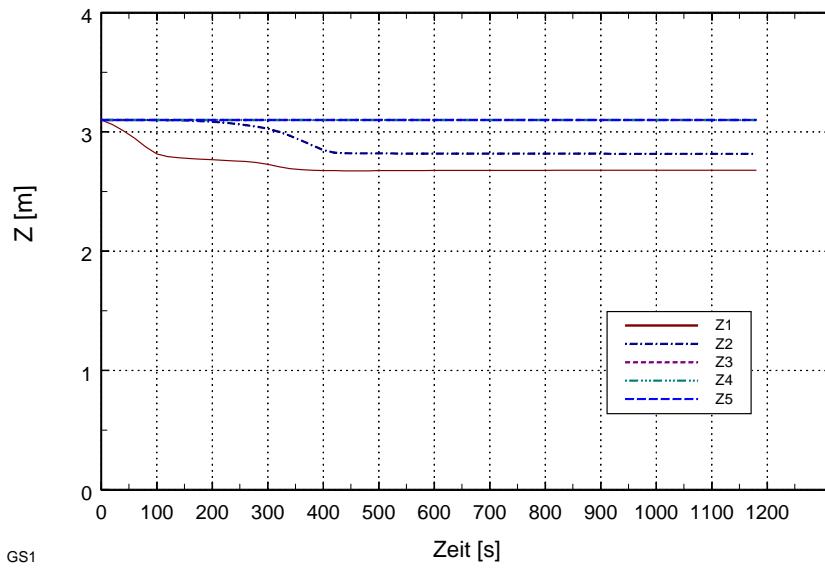


Bild 5.17 Rauchgasfreie Schicht nach Berechnung mit CFAST

Das zweite Beispiel beinhaltet die Berechnung eines sehr hohen Luftraums mit einer relativ komplexen Unterteilung. Die Bilder 5.18 und 5.19 veranschaulichen die Berechnungsergebnisse für zwei unterschiedliche Auslegungen der Entrauchung mit dem oben genannten

5 Modelle für die Brandsimulation

Feldmodell. Dargestellt ist die Rauchgaskonzentration. Man erkennt, dass bei dem gewählten Brandort die hohen Konzentrationen dort auftreten, wo sich die Rauchgase stauen. Es sind aber auch die Besonderheiten der beiden Auslegungsarten zu erkennen. Auch in diesem Fall ist nicht zu erwarten, dass ein Zonenmodell die detaillierten Unterschiede in der Rauchgaskonzentration reproduziert.

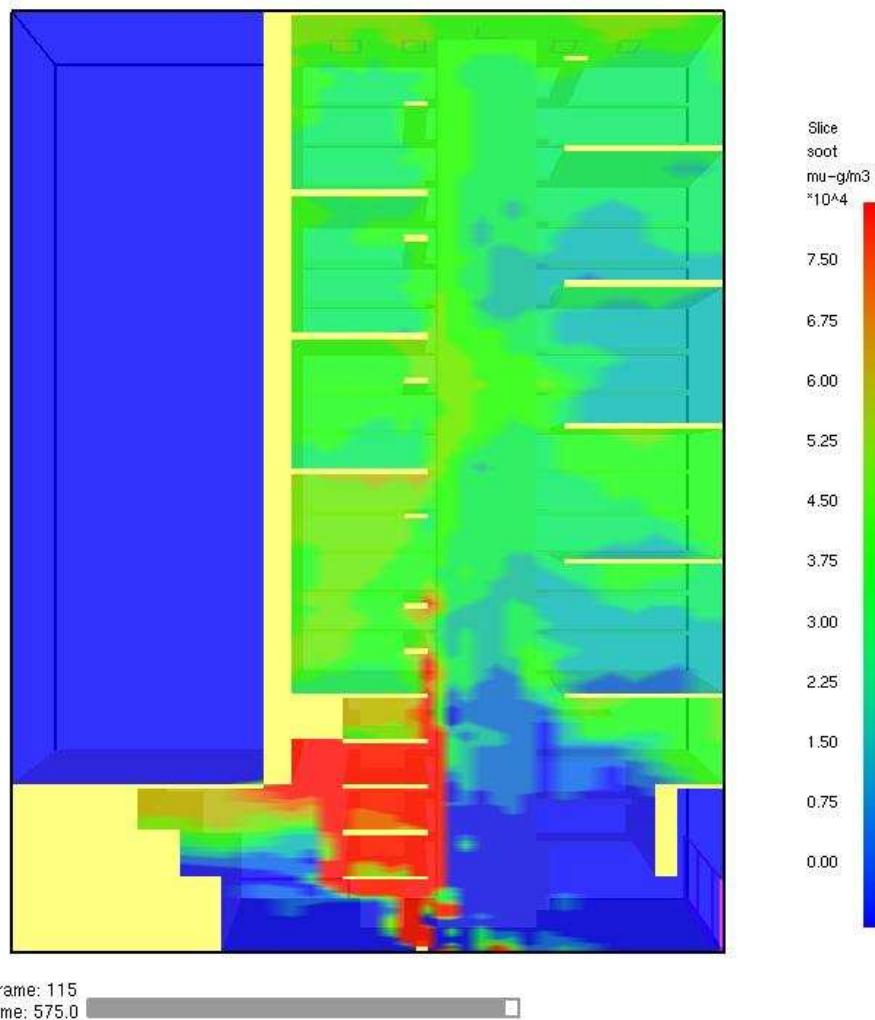


Bild 5.18 Zuluft über Eingangstüren (rechts Erdgeschoss), maschinelle Abluft über Dach
100 m³/s

Die dargestellten 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.

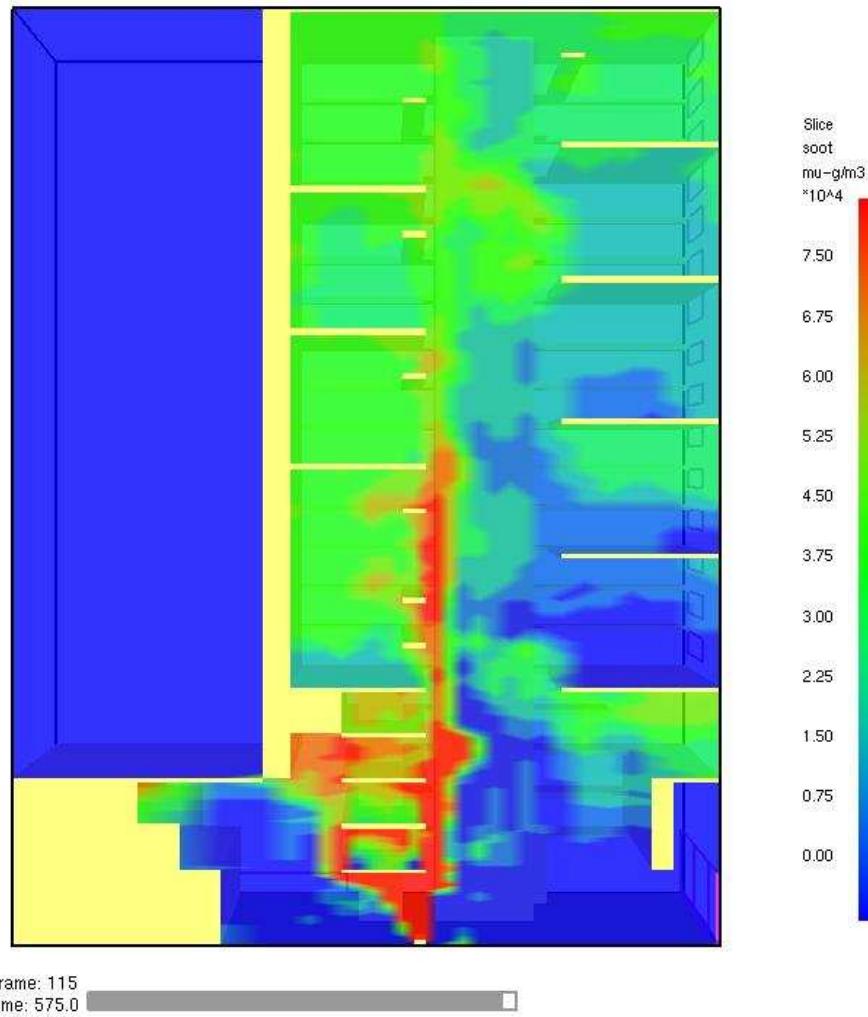


Bild 5.19 Zuluft über Eingangstüren (rechts Erdgeschoss), RWA in der Fassade (rechts)

5.6 Modellanwendung

5.6.1 Auswahl der Szenarien

Der Begriff Brandszenario ist nicht exakt definiert und daher ergeben sich häufig etwas unterschiedliche Standpunkte hinsichtlich des Inhalts. Er wird hier als die Zusammenfassung der wesentlichen Rand- und Anfangsbedingungen einer durchzuführenden Brandsimulationsrechnung verstanden. Dazu gehören im Allgemeinen folgende Festlegungen:

- Brandverlauf mit ggf. vorhandenen Einflussgrößen wie beispielsweise Löschaßnahmen,
- 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 Feldmodelle und Mehrraum-Mehrzonenmodelle hinsichtlich ihres Detaillierungsgrads unterscheiden, ist es möglich, dass die Szenarienauswahl auch von der Wahl des Modells oder des Berechnungsverfahrens abhängt.

5.6.2 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 Charakters dieses Kapitels sprengen, daher erfolgt eine Beschränkung auf die oben genannten klassischen Aufgaben.

Für die Auswahl des Modelltyps ist aber 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 Feldmodellen 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. Die Frage nach den Anwendungsgrenzen eines bestimm-

ten Feldmodells lässt sich also letztlich nur unter Bezug auf den konkreten Anwendungsfall beantworten. Problemstellungen, die eine detaillierte rechnerische Behandlung komplexer Raumströmungen (Kombination aus Raumgeometrie, auftriebsbehafteter Konvektionsströmung und Ventilation) und der damit einhergehenden Phänomene der Rauch- und Wärmeausbreitung beinhalten, erfordern in der Regel den Einsatz eines CFD-Modells.

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 Isoliniedarstellungen) 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.

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

5.6.3 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 Wärmefreisetzungsraten 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.

Wie in Kapitel 5.6.2 beschrieben, kann die Anwendung von Feldmodellrechnungen zur Temperaturbestimmung 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. Beispielsweise ist bei mittleren Rauchgastemperaturen mit geringem Unterschied (wenige Grad) zu den Umgebungstemperaturen u. U. die Schichtungsstabilität nicht mehr gegeben (siehe Beispiele in Kapitel 5.6.2). 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.

5.6.4 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 ist als eine Liste anzusehen, welche die unbedingt erforderlichen Angaben enthält und ggf. zu ergänzen ist:

- Benennung der Nutzung und der anzunehmenden oder vorhandenen Brandlasten.
- Ableitung, bzw. Begründung der daraus folgenden Brandverläufe und deren Darstellung, Begründung des Zusammenhangs mit den angenommenen Brandlasten oder Angabe von unmittelbar anwendbaren Grundlagen (z. B. DIN-Normen, EN-Normen, Experimente).

- Angaben zur untersuchten Geometrie mit Abmessungen, ggf. mit Beschreibung vorgenommener Vereinfachungen oder graphische Darstellung der Berechnungsgebiete.
- Benennung von wesentlichen Quelldaten bei Berechnung der Rauchgaszusammensetzung und / oder Nutzung der Ergebnisse für die Beurteilung der Sichtweite (z. B. untersuchte Zusammensetzung der Brandlast hinsichtlich der Rußausbeute).
- Ggf. Beschreibung und Begründung der untersuchten Szenarien.
- Angabe und Begründung des eingesetzten Simulationsmodells oder Rechenverfahrens.
- Darstellung der Ergebnisse anhand von Diagrammen, Bildern oder Tabellen.
- Konkretisierung der Auslegungsmaßnahmen, ggf. mit ergänzenden Hinweisen.

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 Modelle für die Brandsimulation

- [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*. Section 2. Chapter 2, pp. 2.9 - 2.19.
- [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. B.; FORNEY, G. P.; FLOYD, J. E.; HOSTIKKA, S.: *Fire Dynamics Simulator (Version 2) – User's Guide*. NISTIR 6784, National Institute of Standards and Technology, November 2001.
- [5.22] SCHNEIDER, U.; MAX, U.; LEBEDA, CH.: Untersuchungen zur Bewertung von Brandsimulationsmodellen für die Festlegung ihrer Anwendungsbereiche 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] FRIEDMANN, R.: Survey of Computer Models for Fire and Smoke. *Journal of Fire Protection Engineering* 4 (1992) 81.
- [5.26] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. NFPA, Quincy MA, 3rd Edition, 2002.
- [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. BZW. HEGGER, TH.; MAX, U.; MEHL, F.; SEIFFERT, U.; WATHLING, K.-D.: 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 Modelle für die Brandsimulation

- [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 Brandschutztage '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] Entwurf VDI Richtlinie 6019, Blatt 1, VDI, 2003.
- [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 Freistrahlg- 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] Entwurf VDI Richtlinie 6019, Blatt 2, VDI, 2006.
- [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. 2004.
- [5.68] *GERHARDT, H. J.*: Anmerkungen zur Ähnlichkeit von Modellversuchen bei der Rauchableitung. vfdb-Zeitschrift 2 / 2002. 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., FRANSSEN, 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] *JONES, W. W. et al*: CFAST-Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1030, 2004
- [5.73] *MCGRATTAN, K. B.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; BAUM, H.; REHM, R.*: Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, October 2007.
- [5.74] *MÜNCH, M., KLEIN, R.*: Anforderungen an numerische Berechnungen der Brand- und Rauchausbreitung im Vorbeugenden Brandschutz, vfdb 3/2008
- [5.75] *SCHLESINGER, S.*; Terminology for Model Credibility. Simulation, 32(3): 103-104, 1979

Anhang zu Kapitel 5

Tabelle A5.1 Indizes

M	Modell
O	Original

A5.2 Detaillierte Beschreibung wichtiger Submodelle

Verbrennungsmodelle

Ein Verbrennungsmodell beschreibt quantitativ, welche Produkte aus dem Verbrennungsprozess hervorgehen. Zu diesen Verbrennungsprodukten gehören neben den stofflichen Produkten auch die entstehende Wärme. Die Schwierigkeit bei der Beschreibung der Produkte besteht darin, dass der Verbrennung sehr umfangreiche Reaktionsmechanismen zugrunde liegen, d.h. die Umwandlung des Brennstoffs in die Brandprodukte erfolgt in sehr vielen Einzelschritten. Zum Teil sind mehrere Tausend Elementarreaktionen am Gesamtvergang beteiligt. Bei dem Verbrennungsprozess werden ständig Spezies erzeugt und wieder zerstört und somit sind Prozesse auf molekularer (chemische Reaktionen) und makroskopischer (z.B. Strömung und Diffusion) Ebene beteiligt. Obwohl bestimmte Reaktionen für Verbrennungsprozesse charakteristisch sind und die Geschwindigkeit des Vorgangs bestimmen, sind solche Reaktionsmechanismen nicht für alle praktisch vorkommenden Brennstoffe in ausreichendem Umfang bekannt. Hinzu kommt, dass die genaue mengenmäßige Zusammensetzung der Brandlasten im Allgemeinen nicht bekannt ist, bzw. die genaue zeitliche Abfolge der Brennstoffströme aufgrund des jetzigen Kenntnisstandes nicht vorhergesagt werden kann.

Somit steht man bei den Verbrennungsmodellen vor dem Problem, dass die auftretenden Prozesse bei den zumeist vorliegenden Stoffkombinationen noch nicht ausreichend beschrieben werden können, bzw. einer eigenen Modellierung mit hohem rechnerischen Aufwand bedürfen. Da der Schwerpunkt der Brandmodellierung nicht auf der exakten Vorhersage des Verbrennungsprozesses auf einer eher mikroskopischen Skala liegt, sondern am anderen Ende der Längenskala, geht man i. A. einen anderen Weg. Dieser besteht darin, dass das Brandprodukt Wärme für ausgewählte Kontrollvolumina vom Nutzer der Modelle anhand experimenteller Daten oder als wahrscheinliche Obergrenze vorgegeben wird. Die stofflichen Brandprodukte ergeben sich aus einer allgemeinen Reaktionsgleichung (siehe z.B. [5.72, 5.73]), bei der sich der Brennstoff in die geläufigsten Brandprodukte umwandelt. Die Zwischenschritte, die dafür notwendig sind, werden ausgelassen. Welche Mengen im Einzelnen dabei entstehen, ergibt sich aus experimentell bestimmten Werten, den sogenannten Ausbeuten oder Entstehungsraten (Yields), wobei die Erhaltung der Spezies beachtet wird. Verbrennungsmodelle dieser Art unterscheiden sich lediglich im Umfang der dabei beschriebenen Spezies. Beispielsweise enthält solch ein Verbrennungsmodell auf der Brennstoffseite der chemischen Reaktionsgleichung die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Chlor. Entsprechend werden auf der Produktseite CO_2 , CO , H_2O , HCl , HCN , N_2 , Ruß und unverbrannte Kohlenwasserstoffe behandelt. Da diese Brandprodukte durch die Verbindung mit der umgebenden Luft entstehen, ist es auch möglich die Begrenzung der Verbrennung durch nicht ausreichende Sauerstoffzufuhr zu beschreiben.

Diese Art von Verbrennungsmodellen finden sich in den meisten Zonenmodellen aber auch in CFD-Modellen. Bei CFD-Modellen sind aber auch weitergehende Verbrennungsmodelle in Gebrauch. Beispielsweise wird bei dem Modell FDS ein vereinfachtes Reaktionsschema in Form einer Einschritt-Reaktion von Brennstoff und Luft zu den Reaktionsprodukten analog dem oben behandelten Schema benutzt. Darüber hinaus erfolgt jedoch eine einfache Be-

schreibung der Umsetzung des Brennstoffes zu den Reaktionsprodukten oberhalb der Brennstoffoberfläche mit Hilfe des Mischungsbruchs (Mixture Fraction Combustion Model) [5.73]. Mit Hilfe dieser orts- und zeitabhängigen Größe lässt sich das Verhältnis von Brennstoff, Sauerstoff und Brandprodukten über die Flammenhöhe beschreiben. Es ist daher hier nicht erforderlich, dass der Nutzer die Wärmefreisetzung in ausgewählten Kontrollvolumina vorgibt, dies wird durch das Programm anhand des Mischungsbruchs und einer flächenspezifischen Wärmefreisetzungsraten, bzw. Abbrandrate, berechnet.

Modellierung der Flammen und des Rauchgasplumes

In der Literatur wurden 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 einführt, der im Wesentlichen zu einer Korrektur der Aufstiegshöhe in der entsprechenden Gleichung für die punktförmige Brandquelle führte. 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:

$$\dot{m}_{Pl} = 0,071 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot z^{5/3} \quad (5.19)$$

Darin sind:

\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 Glei-

chung 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 z. B. Bild 5.2) 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 Variable voraus (siehe Bild 5.2).

Anhand der Ergebnisse dieser Vergleiche zwischen den getroffenen Annahmen und den Experimenten wurde deutlich, dass es unterschiedliche Bereiche gibt und die obige Gleichung 5.1 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 5.13) erkennbar, ist diese eine Funktion der Wärmefreisetzungsraten 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 Heskstad [5.13, 5.14, 5.39] enthalten, auch den Durchmesser D der Brandfläche. Da die Wärmefreisetzungsraten 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 Plumemodell 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 neuere 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 5.2 unten) 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 A5.2.1 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.

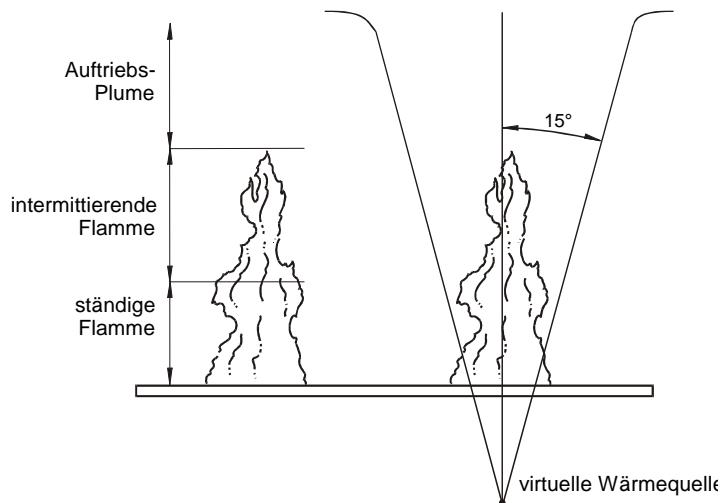


Bild A5.2.1 Schematische Darstellung der Ausbildung von Flamme und Plume nach [5.3, 5.37]

Die Schwierigkeiten bei der Beurteilung der einzelnen Modelle bestehen darin, dass der aufwärts gerichtete Massenstrom entweder nur indirekt gemessen werden kann, bzw. die Direkterfassung 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 unbeeinflusste Plumeströmung 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 weiter unten (Tabelle A5.3) angefügt. Weitere Hinweise zur Anwendung der jeweiligen Gleichungen können weitergehender Literatur entnommen werden [5.10, 5.13, 5.14, 5.16].

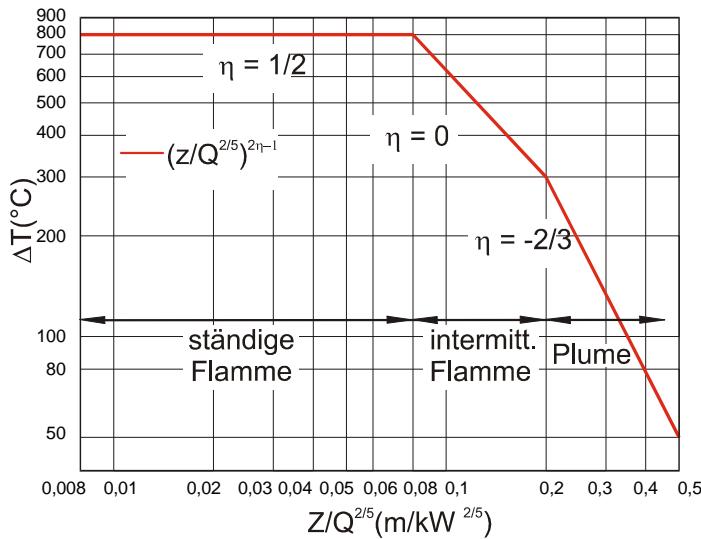


Bild A5.2.2 Temperaturrentwicklung über der Zentralachse der Flamme und des Rauchgasplumes

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 (5.20) bis (5.23) verwenden [5.7 - 5.9].

$$v_{jet,t} = 0,95 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{z} \right)^{1/3} \quad \text{für } \frac{r}{z} \leq 0,15 \quad (5.20)$$

$$v_{jet,t} = 0,2 \cdot \frac{\dot{Q}^{1/3} \cdot z^{1/2}}{r^{5/6}} \quad \text{für } \frac{r}{z} > 0,15 \quad (5.21)$$

$$T_{jet,t} = T_\infty + \frac{16,9 \cdot \dot{Q}^{2/3}}{z^{5/3}} \quad \text{für } \frac{r}{z} \leq 0,18 \quad (5.22)$$

$$T_{jet,t} = T_\infty + \frac{5,38}{z} \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{r} \right)^{2/3} \quad \text{für } \frac{r}{z} > 0,18 \quad (5.23)$$

mit:

- \dot{Q} Energiefreisetzungsr率e [kW]
- r Abstand des Sprinklers von der Plume-Achse [m]
- $T_{jet,t}$ 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 Energiefreisetzungsr率e 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 verminderde Abkühlung über der Höhe eintritt [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].

$$T_{D,t+\Delta t} = (T_{jet,t+\Delta t} - T_{D,t}) \cdot (1 - e^{-1/\tau}) + (T_{jet,t+\Delta t} - T_{jet,t}) \cdot \tau \cdot \left(e^{-1/\tau} + \frac{1}{\tau} - 1 \right) \quad (5.24)$$

$$\tau = \frac{RTI}{\sqrt{v_{jet,t}}} \quad (5.25)$$

5 Modelle für die Brandsimulation

mit

RTI Response Time Index, Maß für die Ansprechempfindlichkeit des Sprinklers $[(\text{ms})^{0.5}]$

$T_{\text{jet}, t+\Delta t}$ Temperatur im Ceiling Jet im nächsten Zeitschritt [°C]

Beispiele für die Anwendung der obigen Gleichungen sind z. B. in [5.11] gegeben.

Plume-Temperaturen

Während durch die Berechnung der Temperaturen im Ceiling Jet nach den Gleichungen (5.20) bis (5.23) 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 Holzkrippen von insgesamt ca. 1.000 kg als Brandlast verwendet. Der Brand wurde unter Vorgabe der gemessenen Abbrandrate mit dem Brandsimulationsmodell HARVARD VI nachgerechnet. Bild A5.2.3 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 Plumebereich, 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.

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 Energiefreisetzungsraten 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.

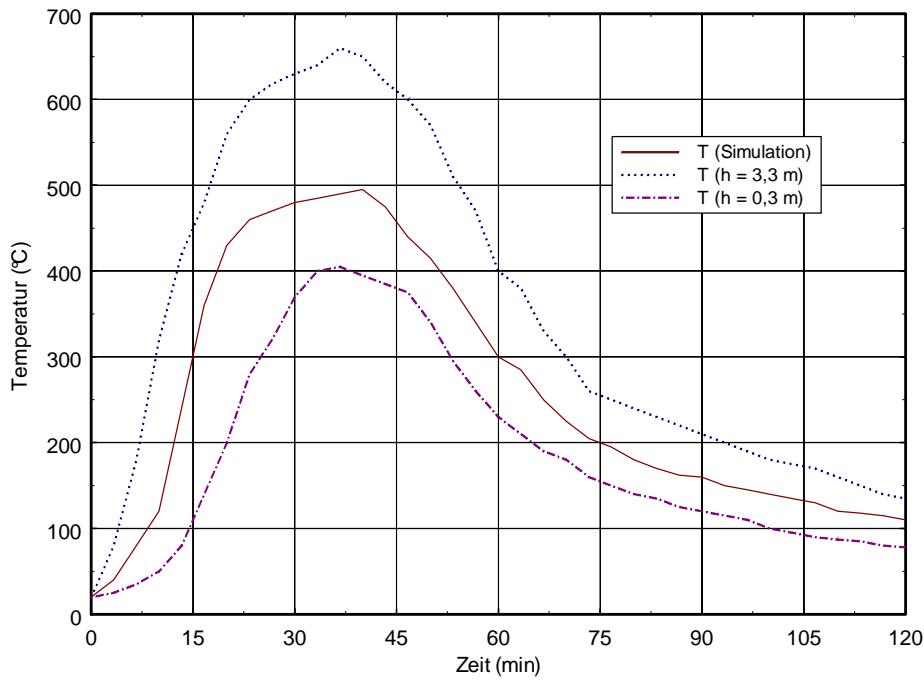


Bild A5.2.3 Vergleich der gemessenen Temperaturen beim Brandversuch mit den Werten aus der Berechnung mit HARVARD VI

Das Heskestad-Delichatsios Modell [5.15] (H-D-Modell) für die Berechnung der Temperaturerhöhung ΔT_p im Falle ohne Heißgasschicht lautet:

$$\Delta T_p = T_\infty \left(\dot{Q}^* \right)^{2/3} \cdot \left(0,188 + 0,313 \cdot \frac{r}{z} \right)^{-4/3} \quad (5.26)$$

$$\dot{Q}^* = \frac{(1 - \chi_r) \cdot \dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot g^{1/2} \cdot z^{5/2}} \quad (5.27)$$

mit

- \dot{Q} Energiefreisetzungsrate 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 Energiefreisetzungsrate [-]
- z vertikaler Abstand von der Brandherdoberfläche zum Berechnungsort [m]
- r radialer Abstand zur Plume-Achse [m]

5 Modelle für die Brandsimulation

Dieser Modellansatz bietet den Vorteil einer gemeinsamen Gleichung für die Mittelachse ($r = 0 \text{ m}$) und einem radialen Abstand r . Speziell für die Mittelachse mit $r = 0 \text{ m}$ ergibt sich

$$\Delta T_p = 9,28 \cdot T_\infty (\dot{Q}^*)^{2/3} \quad (5.28)$$

Bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C (293 K) folgt daraus folgende einfache Formel für die Plume-Achse

$$\Delta T_p = 25,5 \cdot \frac{((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q})^{2/3}}{z^{5/3}} \quad (5.29)$$

$$T_p = T_\infty + \Delta T_p \quad (5.30)$$

Zur Umrechnung auf [°C] ist lediglich der Wert von 273 K zu subtrahieren.

Nähert man sich im Abstand z dem Flammenbereich, steigen die berechneten Temperaturwerte i. A. stark an und können unrealistisch hohe Werte annehmen. Daher sind diese auf realistische Werte zu beschränken, die für die meisten Fälle durch eine obere Schranke von 1.000 °C - 1.200 °C (maximale Flammentemperatur) gegeben ist. Es ist jedoch zu prüfen, ob dies im Einzelfall ausreicht, da gewisse Brennstoffe (z. B. brennbare Flüssigkeiten) auch höhere Werte aufweisen können. Hierfür sind experimentelle Ergebnisse heranzuziehen. Um zu prüfen, ob man sich dem Flammenbereich nähert, kann die mittlere Flammenhöhe berechnet werden [5.14, 5.16].

$$Z_f = 0,235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \cdot D_f \quad (5.31)$$

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].

$$\Delta T_p = 78,4 \cdot \frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \quad \text{für } 0,08 \cdot \dot{Q}^{2/5} \leq z < 0,20 \cdot \dot{Q}^{2/5} \quad (5.32)$$

$$\Delta T_p = 25,5 \cdot \frac{((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q})^{2/3}}{z^{5/3}} \quad \text{für } 0,20 \cdot \dot{Q}^{2/5} \leq z \quad (5.33)$$

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.

Im Fall einer Heißgasschicht, die sich im Verlauf des Brandes entwickelt hat, sind diese Gleichungen 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-Centerlinientemperatur 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 Energiefreisetzungsrates 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 $z_{l,1}$ benötigt. Diese Werte sind mit Hilfe der Brandsimulationsrechnung zu bestimmen. Im Folgenden soll die Anwendung dieses Ansatzes [5.17] beschrieben werden.

Zunächst wird die Energiefreisetzungsrates \dot{Q} des realen Brandherdes in einen dimensionslosen Wert umgerechnet.

$$\dot{Q}_{l,1}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot g^{1/2} \cdot z_{l,1}^{5/2}} \quad (5.34)$$

mit

- $\dot{Q}_{l,1}^*$ dimensionslose Energiefreisetzungsrates des realen Brandherdes [-]
- \dot{Q} Energiefreisetzungsrates 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]
- $z_{l,1}$ Distanz des realen Brandherdes zur Grenzfläche zwischen oberer und unterer Schicht [m]

Anschließend wird die dimensionslose Energiefreisetzungsrates $\dot{Q}_{l,2}^*$ der „virtuellen Wärmequelle“ berechnet, welche die real vorhandene Energiefreisetzungsrates ersetzt und innerhalb einer ebenfalls modifizierten Rauchgasschicht liegt.

$$\dot{Q}_{l,2}^* = \left[\frac{1 + C_T \cdot (\dot{Q}_{l,1}^*)^{2/3}}{C_T \cdot \xi} - \frac{1}{C_T} \right]^{3/2} \quad (5.35)$$

mit

- $\dot{Q}_{l,2}^*$ dimensionslose Energiefreisetzungsrates der „virtuellen Wärmequelle“ [-]

5 Modelle für die Brandsimulation

C_T Konstante (9,115) [-]

ξ Temperaturverhältnis von Rauch- und Kaltgasschicht (T_s/T_∞) [-]

β^2 0,913 (Verhältnis von Temperatur zu Geschwindigkeit im Profil) [-]

Der Abstand $z_{l,2}$ der „virtuellen Wärmequelle“ zur Grenzfläche zwischen oberer heißer Rauchgasschicht und Kaltgasschicht ergibt sich zu:

$$z_{l,2} = z_{l,1} \cdot \left[\frac{\xi \cdot C_T \cdot \dot{Q}_{l,1}^*}{\left(\dot{Q}_{l,2}^* \right)^{1/3} \cdot \left[(\xi - 1) \cdot (\beta^2 + 1) + \xi \cdot C_T \cdot \left(\dot{Q}_{l,2}^* \right)^{2/3} \right]} \right]^{2/5} \quad (5.36)$$

Diese Größen werden für eine modifizierte Eingabe in die Centerline-Temperatur oder Ceiling Jet-Temperatur benutzt. Außerdem ergibt sich eine modifizierte Raumhöhe H_2 :

$$H_2 = H_1 - z_{l,1} + z_{l,2} \quad (5.37)$$

und

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{l,2}^* \cdot \rho_s \cdot c_p \cdot T_s \cdot g^{1/2} \cdot z_{l,2}^{5/2} \quad (5.38)$$

ρ_s und T_s sind die neuen Umgebungsbedingungen mit den Werten aus der Heißgasschicht, wobei gilt:

$$\rho_0 \cdot T_0 = \rho_s \cdot T_s = 353 \text{ kg/m}^3 \text{K} = \text{const.} \quad (5.39)$$

Aus diesen Werten wird jetzt die Temperatur unter der Decke ($r = 0$) berechnet, in dem die neuen Werte in Gleichung (5.33) eingesetzt werden:

$$T_p = T_s + 25,5 \cdot \frac{\left((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q}_2 \right)^{2/3}}{H_2^{5/3}} \quad (5.40)$$

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].

$$\Delta T_{jet} = \frac{C}{r^\gamma} \quad (5.41)$$

$$C = k \cdot r_0^\gamma \cdot \Delta T_p \quad (5.42)$$

$$k = 0,68 + 0,16 \cdot \left(1 - e^{-d} \right) \quad (5.43)$$

$$r_0 = 0,18 \cdot H \quad (5.44)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} - \alpha \cdot (1 - e^{-d}) \quad (5.45)$$

$$T_{jet} = T_s + \Delta T_{jet} \quad (5.46)$$

mit

ΔT_{jet} Temperaturdifferenz zwischen Ceiling Jet und Heißgasschicht [°C]

T_{jet} Ceiling Jet-Temperatur [°C]

$T_{Heißgas}$ 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.

5 Modelle für die Brandsimulation

Tabelle A5.3: 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. Commentary on the equations given in Part 1.

Zeile	Geometrie	sonstige Bedingungen, Gültigkeitsbereich	Formel	Grenzwerte von β nach BSI DD 240: part 2:1997	Kommentar
1	Axialsymmetrie, Lachenbrand, kleine Brandfläche, kein Wandeinfluss	$D \leq z / 10$ $z >> z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,071 \cdot \dot{Q}_P^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3}$	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	$D \leq z / 10$ $z >> z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,044 \cdot \dot{Q}_P^{1/3} \cdot z^{5/3}$	0,6 ... 1,6	Einfluss der Umgebungsturbulenz + 20 % bis + 50 %
4	an Wanddecke anliegende Strömung	$D \leq z / 10$ $z >> z_{fl}$	$\dot{m}_e = 0,028 \cdot \dot{Q}_P^{1/3} \cdot z^{5/3}$	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 x 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 siehe NFPA 92 B	$b_F \gg h$, bei anderen Geometrien der Öffnung etc.	$\dot{m}_e = 0,23 \cdot \dot{Q}_P^{1/3} \cdot b_F^{2/3} \cdot (z_F + h)$	0,7 ... 1,5	frei aufströmendes Rauchgas, bei Anlehnung an aufgehende Wand \dot{m}_e um 1/3 reduzieren
10	wie vor, jedoch mit Balkon und Rauchschürzen außerhalb des Brandraums	$l_{RS} \gg h_B$	$\dot{m}_e = 0,36 \cdot \dot{Q}_P^{1/3} \cdot l_{RS}^{2/3} \cdot (z_B + 0,25 \cdot h_B)$	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 siehe nächste Seite

(++) Kommentar zu den Zeilen 10 und 11 der Tabelle A5.2:

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 konservative, 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!

6 BRANDSCHUTZTECHNISCHE NACHWEISE VON BAUTEILEN UND TRAGWERKEN

6.1 Nachweisverfahren

Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken des Hochbaus können in Deutschland nach DIN 4102 [6.1] oder den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6 [6.2 bis 6.8] durchgeführt werden. Der brandschutztechnische Nachweis umfasst den Nachweis der Tragfähigkeit, des Raumabschlusses und der Wärmedämmung unter Brandbeanspruchung. Der brandschutztechnische Nachweis kann mit Hilfe von Bemessungstabellen oder durch Anwendung von vereinfachten oder allgemeinen Rechenverfahren geführt werden. Tabellarische Nachweise sind in DIN 4102 Teil 4 und in den meisten Brandschutzteilen der Eurocodes 2 bis 6, vereinfachte und allgemeine Rechenverfahren sind nur in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 bis 6 enthalten.

Der brandschutztechnische Nachweis mit Hilfe von Bemessungstabellen liegt im Allgemeinen stark auf der sicheren Seite, es handelt sich im Vergleich zu den rechnerischen Verfahren um einen konservativen Nachweis. Wirklichkeitsnäher wird das Tragverhalten durch die aufwändigeren vereinfachten und allgemeinen Rechenverfahren wiedergegeben. Die Wahl des angemessenen Verfahrens hängt von den benötigten Aussagen und der geforderten Genauigkeit ab. Das bedeutet, dass in vielen Fällen die brandschutztechnische Bemessung nach dem in Bild 6.1 dargestellten Ablaufdiagramm durchgeführt werden kann.

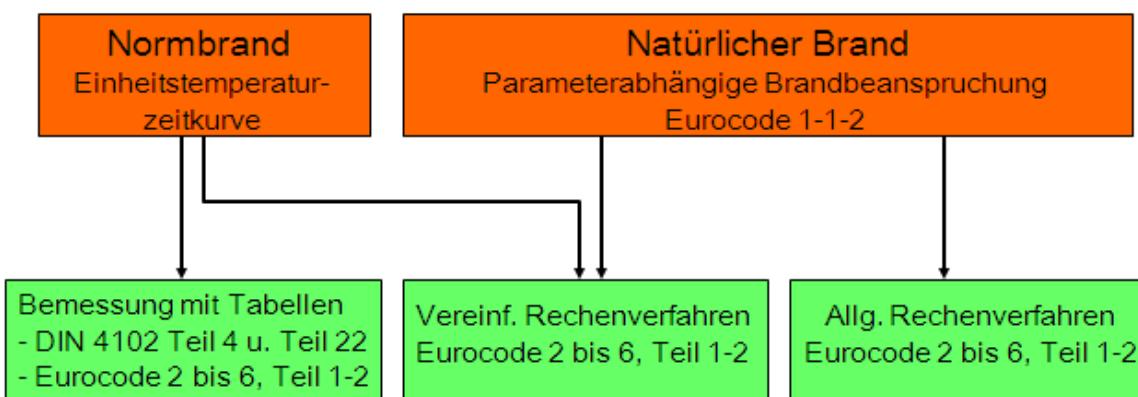


Bild 6.1 Zuordnung zwischen Brandbeanspruchung und Nachweisverfahren

6.2 Anwendungsbereiche

Die Brandschutzteile der Eurocodes 2 bis 6 unterscheiden zwischen Nachweisen für Gesamttragwerke, Tragwerksausschnitte und Einzelbauteile.

Der brandschutztechnische Nachweis eines Gesamttragwerks muss die maßgebende Versagensart unter Brändeinwirkung erfassen und dafür die temperaturabhängigen Veränderungen der Baustoffe und der Bauteileigenschaften sowie die Wirkung der thermischen Ausdehnungen und Verformungen berücksichtigen. Für diese Nachweisform sind im Prinzip nur die allgemeinen Rechenverfahren (Abschnitt 6.5.5) geeignet. Für die Analyse von Teilen des Tragwerks (Tragwerksausschnitte) und von Einzelbauteilen kommen in der Regel die vereinfachten Rechenverfahren (Abschnitt 6.5.4) und die Bemessungstabellen (Abschnitt 6.4.2 und 6.5.3) zum Einsatz.

Im Industriebau können Bauteile mit Hilfe des Berechnungsverfahrens nach DIN 18230 „Baulicher Brandschutz im Industriebau“ [6.9] für eine risikogerechte Brandbeanspruchung bemessen werden (Abschnitt 6.7).

Die Entscheidung, ob die brandschutztechnische Bemessung nach DIN 4102 oder den Brandschutzteilen der Eurocodes vorgenommen wird, hängt von den Bemessungsnormen ab, die für die Gebrauchslastfälle verwendet wurden. Die Bemessungsregeln für die Gebrauchslastfälle und für den Brandschutz müssen aus der gleichen Normenfamilie (DIN oder Eurocode) stammen (Mischungsverbot). Damit wird sichergestellt, dass die brandschutztechnische Bemessung nach DIN 4102 immer im Zusammenhang mit einer Bemessung der Gebrauchslastfälle nach DIN steht und dass die brandschutztechnische Bemessung nach Eurocode immer auf einer „kalten“ Bemessung nach Eurocode beruht. Bild 6.2 zeigt diese Zuordnung am Beispiel der Eurocodes 2 bis 6 und Bild 6.3 am Beispiel der Brandschutznorm DIN 4102-4 (03.94).

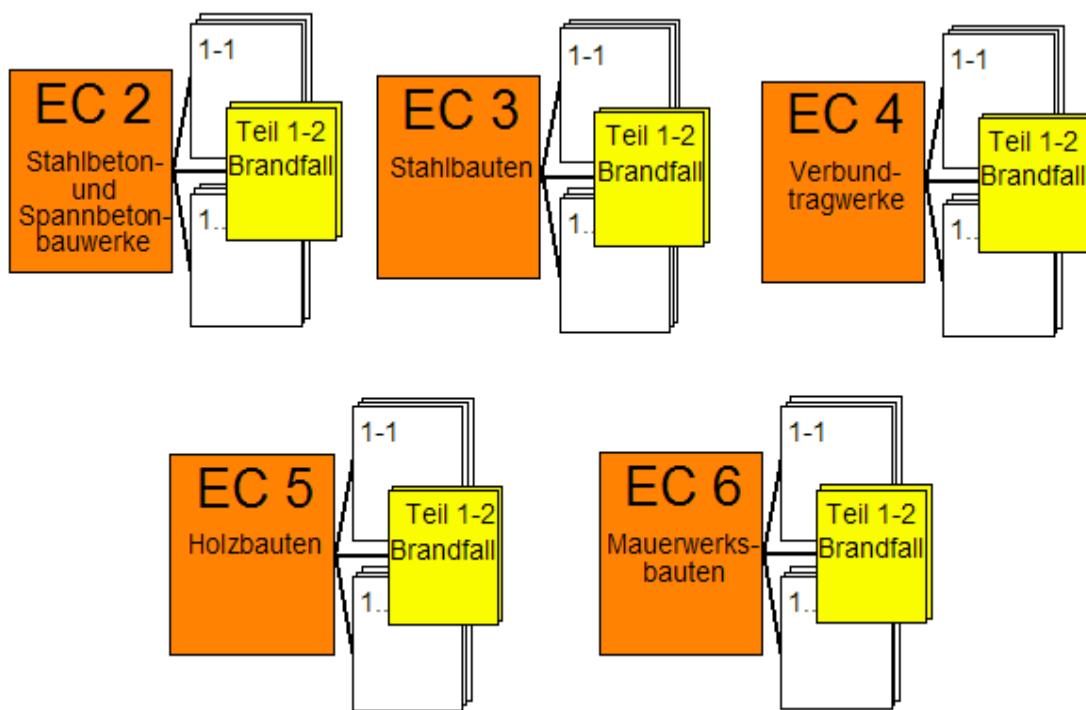


Bild 6.2 Gliederung der konstruktiven Eurocodes

Aus dem Vergleich der Bilder 6.2 und 6.3 wird die unterschiedliche Gliederung der deutschen und der europäischen Brandschutznorm deutlich: DIN 4102-4 enthält brandschutztechnische Bemessungsregeln für alle Konstruktionsbaustoffe während die Brandschutzteile des Eurocodes (Teil 1-2) immer nur die brandschutztechnischen Bemessungsregeln für Bau teile des „kalten“ Eurocodes enthalten.

Neben dem Mischungsverbot von DIN- und Eurocode-Normen, dürfen auch keine DIN-Normen unterschiedlicher Normengenerationen zusammen angewendet werden. Das bedeutet für die brandschutztechnische Bemessung nach DIN 4102-4 (03.94), dass die für die Gebrauchslastfälle geltenden neuen Konstruktionsnormen, die in den letzten Jahren auf das in Europa übliche semi-probabilistische Sicherheitskonzept umgestellt wurden, nur unter

Zuhilfenahme einer neuen Anwendungsnorm DIN 4102-22 verwendet werden dürfen [6.10]. Bild 6.4 zeigt den Fall, dass die Gebrauchslastfälle nach den neuen Konstruktionsnormen bemessen wurden und die brandschutztechnische Bemessung nach DIN 4102-4 (03.94) und Teil 22 durchgeführt wird.

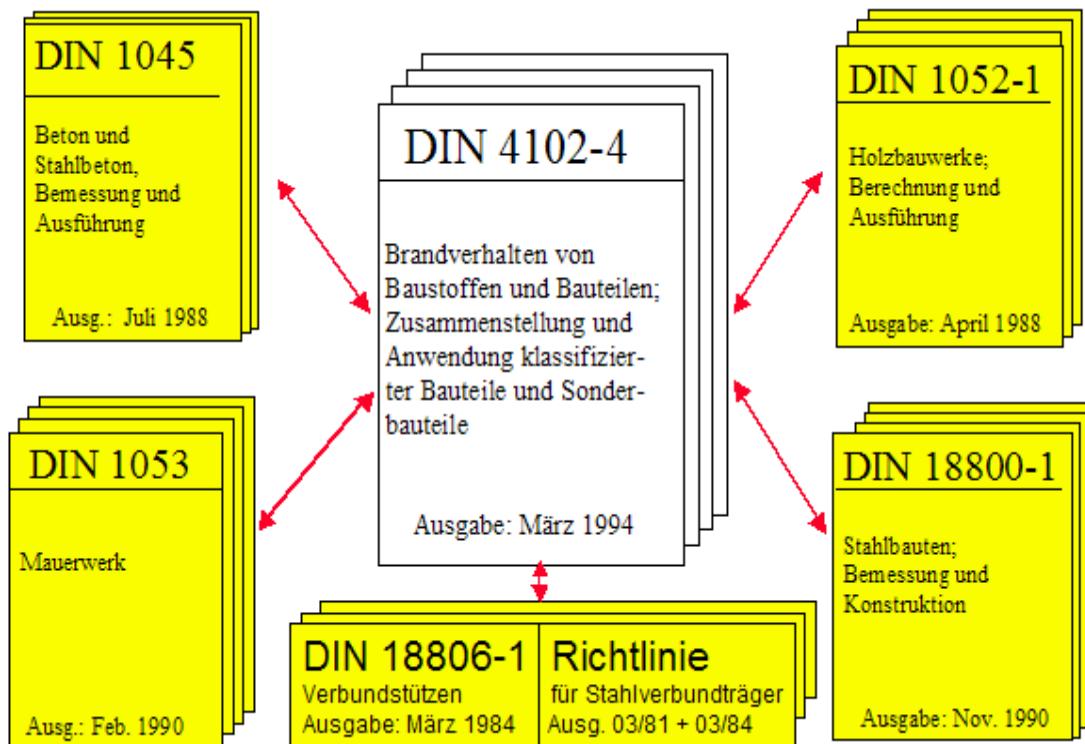


Bild 6.3 Zusammenhang zwischen Brandschutznorm DIN 4102-4 (03.94) und den für die Gebrauchslastfälle geltenden Konstruktionsnormen

Bei der Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen muss aufgrund der technischen Fortschreibung der DIN 1045-1 (07.01), ihrer bauaufsichtlichen Einführung im Juli 2001 und der gleichzeitigen Streichung des Eurocodes 2 (DIN V ENV 1992 Teil 1-1 und 1-3 bis 1-6) in der Liste der Technischen Baubestimmungen sowie der Bauregelliste A Teil 1 [6.11] beachtet werden, dass damit keine Bemessung der Gebrauchslastfälle nach Eurocode 2 Teil 1-1 und dadurch auch keine brandschutztechnische Bemessung nach Eurocode 2 Teil 1-2 möglich ist. Im Hinblick auf die mittelfristig vorgesehene Umstellung von deutschen auf europäische Normen werden im Folgenden aber auch die brandschutztechnischen Bemessungsregeln des Eurocodes 2 Teil 1-2 dargestellt.

Für Bauarten, für die aufgrund des komplexen Trag- und Verformungsverhaltens unter Brändeinwirkung kein normierter Nachweis geführt werden kann (z. B. Verglasungen, Abschottungen) ist der Nachweis durch ein aufgrund eines Brandversuches erstelltes Prüfzeugnis erforderlich, für den eine bauaufsichtlich anerkannte Stelle kontaktiert werden muss. Das Verzeichnis der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen nach den Landesbauordnungen wird vom DIBt herausgegeben und jährlich aktualisiert. Es wird in der Sonderheftreihe der DIBt-Mitteilungen veröffentlicht.

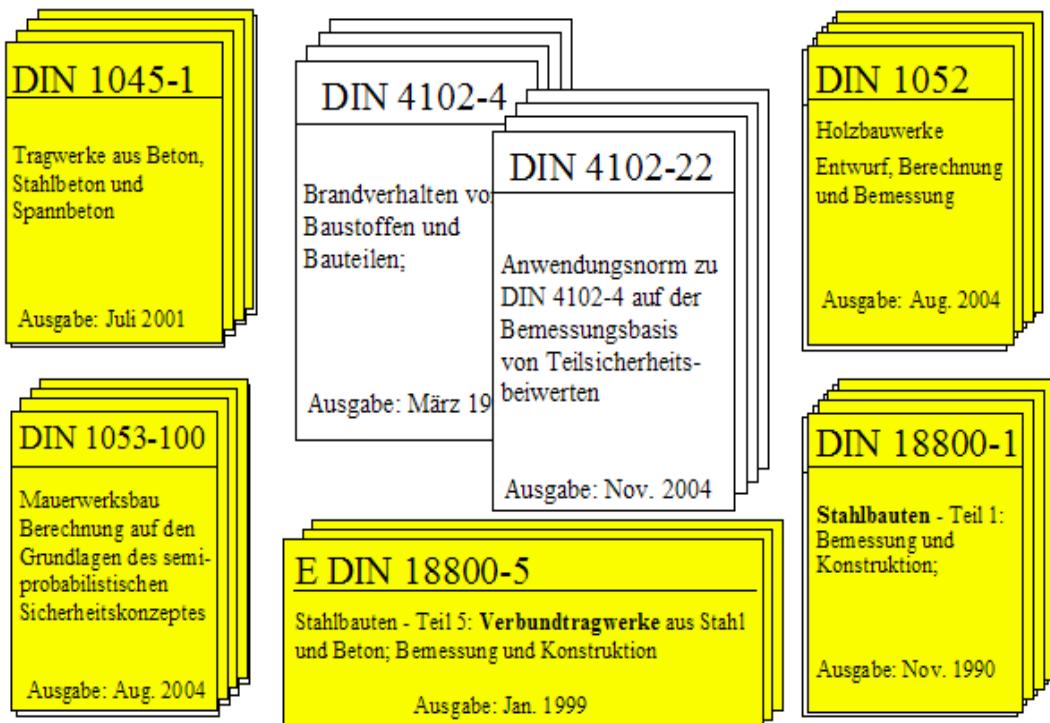


Bild 6.4 Zusammenhang zwischen Brandschutznorm DIN 4102-4 (03.94) und Teil 22 sowie den für die Gebrauchslastfälle geltenden neuen Konstruktionsnormen

6.3 Begriffe für Bauteil- und Tragwerksnachweise

Die nachfolgende Übersicht fasst die wesentlichen in Kapitel 6 verwendeten Begriffe unter Angabe einer kurzen Definition bzw. Beschreibung zusammen. Die Begriffe sind nicht alphabetisch, sondern in thematisch zusammengehörigen Gruppen angeordnet. Formelzeichen und Dimensionen werden im Anhang des Leitfadens erläutert.

Feuerwiderstandsdauer	Dauer in Minuten, während der ein Bauteil unter praxisgerechten Randbedingungen und unter einer bestimmten Brandbeanspruchung die Anforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit und/oder Raumabschluss erfüllt.
Feuerwiderstandsklasse	DIN: Einstufung der Bauteile entsprechend ihrer Feuerwiderstandsdauer in F 30, F 60, F 90, F 120 und F 180 Klassen. Neben der Einstufung für Bauteile gibt es u. a. noch die Feuerwiderstandsklassen für Feuerschutzabschlüsse (T ..), Verglasungen (G ..), Lüftungsleitungen (L ..) und Brandschutzklappen (K ..).
EC:	Klassifizierung der Bauteile nach dem europäischen Grundlagendokument Brandschutz [6.12]: R – Feuerwiderstandsdauer, während der die Tragfähigkeit erhalten bleibt RE – Feuerwiderstandsdauer, während der die Tragfähigkeit und der Raumabschluss erhalten bleiben

	<p>REI – Feuerwiderstandsdauer, während der die Tragfähigkeit, der Raumabschluss und die Wärmedämmung erhalten bleiben</p> <p>REI-M – wie REI, zusätzlich widerstandsfähig gegen mechanische Beanspruchung</p> <p>Die Brandschutzteile der Eurocodes 2 - 6 enthalten Feuerwiderstandsdauern von 30, 60, 90, 120, 180 und 240 Minuten.</p> <p>Neben den Klassifizierungen für Bauteile gibt es nach europäischer Normung noch Kennzeichnungen für W (Strahlungsdurchlässigkeit), C (Selbstschliessen von Feuerschutzabschlüssen) und S (Leckrate für Rauchdurchtritt).</p>
Raumabschluss	(nur EC): Fähigkeit eines trennenden Bauteils, bei Brandbeanspruchung auf der einen Seite zu verhindern, dass Flammen oder heiße Gase durch es hindurch gelangen und Flammen auf der anderen (brandabgekehrten) Seite auftreten
Wärmedämmung	(nur EC): Fähigkeit eines trennenden Bauteils, bei Brandbeanspruchung auf der einen Seite die Temperaturentwicklung auf der anderen (brandabgekehrten) Oberfläche auf bestimmte Größen zu begrenzen
Einheitstemperaturzeitkurve	Normbrandkurve nach DIN 4102-2 (bzw. DIN EN 1363-1) für kurve (ETK) Bauteilprüfungen. EC: Nominelle Temperaturzeitkurve nach EC 1 Teil 1-2
Brandlastdichte	EC: Brandlast je Flächeneinheit bezogen auf die Geschossfläche
Brandlast	Summe der Wärmeenergien, die bei der Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem Gebäudebereich frei werden
Temperaturzeitkurven	Brandgastemperaturen in der Umgebung der Bauteilloberflächen in Abhängigkeit von der Zeit
Natürlicher Brand	Im Gegensatz zum Normbrand realer Brandverlauf, der sich in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen wie u. a. Brandlast, Ventilationsbedingungen, thermische Eigenschaften der Umfassungsbauteile und Brandraumgeometrie einstellt
kritische Temperatur	DIN: Die kritische Temperatur crit T des Bewehrungs- oder Bau- stahls ist die Temperatur, bei der die Bruch- bzw. Streckgrenze des Stahls auf die im Bauteil vorhandene Stahlspannung absinkt. EC: Temperatur, bei der unter einer gegebenen Belastung – bei Stahlbauteilen bei gleichförmiger Temperaturverteilung im Querschnitt – Versagen der Bewehrung bzw. des Stahlbauteils zu erwarten ist.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

Achsabstand	DIN: Der Achsabstand u der Bewehrung ist der Abstand zwischen der Längsachse der tragenden Bewehrungsstäbe (Längsstäbe) oder Spannglieder und der beflammteten Betonoberfläche. EC: Achsabstand a, Definition wie oben
mittlerer Achsabstand	DIN: Bei einlagig bewehrten Balken mit unterschiedlichen Stabdurchmessern und mehrlagig bewehrten Balken muss der mittlere Achsabstand $u_m = \frac{A_1 \cdot u_1 + A_2 \cdot u_2 + \dots + A_n \cdot u_n}{\sum A_1, \dots, n}$ eingehalten werden . EC: mittlerer Achsabstand a_m , Definition wie oben
Profilfaktor	DIN: U/A- Wert zur Berechnung der Erwärmung von Stahlbauteilen, Umfang U im Verhältnis zur Querschnittsfläche A [1/m] in Abhängigkeit der Beflammlung (3- oder 4-seitig) und der Bekleidung (profilfolgend oder kastenförmig). EC: A_m/V - Wert für ungeschützte Stahlbauteile; A_p/V - Wert für bekleidete Stahlbauteile; Dimension von Umfang und Querschnittsfläche pro Längeneinheit, Definition wie oben.
Schutzbewehrung	DIN: Um ein frühzeitiges Abfallen von Betonschichten bei biegebeanspruchten Bauteilen zu vermeiden, ist für Feuerwiderstandsklassen > F 90 bei Betondeckungen $c > 50$ mm eine Schutzbewehrung mit Bewehrungsstäben $\emptyset \leq 8$ mm, Abstand ≤ 50 mm erforderlich.

6.4 Nachweise nach DIN 4102-4

6.4.1 Grundlagen

DIN 4102 ist die klassische Brandschutznorm in Deutschland, in der die Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen geregelt sind. DIN 4102-4 beinhaltet eine Zusammenstellung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, die im Wesentlichen aus Ergebnissen von Brandversuchen und -prüfungen zusammengestellt wurden:

- Liste der Baustoffe der Klasse A und der Klasse B nach DIN 4102-1
- Stahlbeton- und Spannbetonbauteile (Balken, Stützen, Platten, Wände, Fertigteile)
- Mauerwerkswände
- Trockenbauteile (Gipskartonwände, Holzwolle-Leichtbauplattenwände, Unterdecken)
- Holzbauteile (Balken, Stützen, Holzbalkendecken, Holztafelbauweise, Verbindungen)
- Stahlbauteile (Träger und Stützen)
- Verbundbauteile (Träger und Stützen)

- Sonderbauteile (Brandwände, Abschlüsse, Verglasungen, Installationskanäle, Bedachungen).

Für die Bauteile, die in DIN 4102-4 erfasst sind, ist der Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit auf Grundlage der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102-2 hinsichtlich Tragfähigkeit, Raumabschluss und Wärmedämmung erbracht. Für Bauteile, die nicht in DIN 4102-4 klassifiziert sind, ist der Nachweis einer ausreichenden Feuerwiderstandsfähigkeit gemäß Zulassungsbedürftigkeit durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis einer anerkannten Prüfstelle oder eine Zustimmung im Einzelfall der obersten Bauaufsichtsbehörde zu erbringen. Grundlage dieser Nachweise sind Prüfzeugnisse, die durch Prüfungen nach DIN 4102, Teil 1 bis Teil 3, Teil 5 bis Teil 19 und Teil 21 erstellt werden.

Neben den Bemessungstabellen für Bauteile in heute üblicher Konstruktion und Ausführung enthält DIN 4102-4 mehrere Bemessungstabellen für Bauteile, die heute selten oder nicht mehr ausgeführt werden. Dazu zählen Stahlsteindecken, Decken mit eingebetteten Stahlträgern, Stahlträger mit Ausmauerung und Putzbekleidung sowie Stahlstützen mit einer Bekleidung aus Beton oder Mauerwerk. Zu den Bemessungstabellen werden umfangreiche Hinweise zur konstruktiven Ausführung der Bauteile und der verwendeten Bekleidung gegeben.

6.4.2 Brandschutztechnische Bemessung

In Abhängigkeit folgender Einflussgrößen kann für die in Tabellenform klassifizierten Bauteile und Sonderbauteile in DIN 4102-4 ein Schnellnachweis zur Einstufung in eine Feuerwiderstandsklasse F 30 bis F 180 geführt werden:

- a) verwendeter Baustoff oder Baustoffverbund,
- b) Brandbeanspruchung (ein- oder mehrseitig),
- c) Bauteilabmessungen (Querschnittsabmessungen, Schlankheit, Achsabstände usw.),
- d) bauliche Ausbildung (Anschlüsse, Auflager, Halterungen, Befestigungen, Fugen, Verbindungsmittel usw.),
- e) statisches System (statisch bestimmte oder unbestimmte Lagerung, einachsige oder zweiachsige Lastabtragung, Einspannung usw.),
- f) Ausnutzungsgrad der Beanspruchung (Verhältnis der vorhandenen Beanspruchung zur zulässigen Beanspruchung) oder der Festigkeit (Verhältnis der vorhandenen Spannung zur zulässigen Spannung) und
- g) Anordnung von Bekleidungen (Ummantelungen, Putze, Unterdecken, Vorsatzschalen).

Der brandschutztechnische Nachweis nach DIN 4102-4 wird in der Regel mit Hilfe von Bemessungstabellen geführt. Für Stahlbeton-, Spannbeton-, Mauerwerks-, Verbund- und Holzbauteile werden die vorhandenen Querschnittsabmessungen mit den in den Tabellen gegebenen Mindestabmessungen verglichen, für Stahlbauteile werden Mindestbekleidungsdicken vorgegeben. Bei Einhalten der tabellierten Mindestwerte und der Einflussgrößen a) bis g) wird sichergestellt, dass für eine Brandbeanspruchung entsprechend der ETK die geforderte

Feuerwiderstandsdauer für das Bauteil bei einer Sicherheit von 1,0 erreicht wird. Da in den Bemessungstabellen nur diskrete Mindestwerte angegeben werden, kann für dazwischenliegende Werte linear interpoliert werden. Die Bemessungstabellen wurden zum großen Teil auf Grundlage von Ergebnissen aus Brandversuchen und -prüfungen entwickelt.

Sofern die Mindestbauteilabmessungen in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad angegeben werden, dürfen Zwischenwerte für die Abmessungen durch lineare Interpolation bestimmt werden. Der Ausnutzungsgrad stellt das Verhältnis des Bemessungswertes der Längskraft im Brandfall zum Bemessungswert des Bauteilwiderstandes bei Normaltemperatur dar. Er ist damit von der Bemessungsnorm für Normaltemperatur abhängig. Da in Deutschland die nationalen Bemessungsnormen für Normaltemperatur entsprechend den Eurocodes für die Bemessung auf der Basis von Teilsicherheitsbeiwerten umgestellt wurden, musste auch die DIN 4102-4 entsprechend überarbeitet werden. In der Anwendungsnorm DIN 4102-22 [6.1] werden die Regelungen in DIN 4102-4 an das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte in den nationalen Bemessungsnormen wie DIN 1045-1 angepasst. Die Klassifizierung von Einzelbauteilen nach DIN 4102-4 setzt eine ausreichende Feuerwiderstandsdauer der lastabtragenden und aussteifenden Bauteile voraus, die mindestens die gleiche Feuerwiderstandsdauer haben müssen. Ein Balken ist z. B. nur dann in die Feuerwiderstandsklasse F 90 einzzuordnen, wenn die durch Konsolen oder Stützen gebildeten Auflagerungen sowie die Aussteifungskonstruktion ebenfalls eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten oder größer haben.

Durch die Tabellenwerte der DIN 4102-4 wird bei brandbeanspruchten Stahlbetonbalken und -decken Biegebruch ausgeschlossen; Schubbruch wird für die Feuerwiderstandsklassen F 30 bis F 90 für alle Schubbereiche nach DIN 1045 (07.88) ausgeschlossen. Bei den Feuerwiderstandsklassen F 120 und F 180 müssen bei Balken im Schubbereich 2 und 3 nach DIN 1045 (07.88) stets ≥ 4 -schnittige Bügel angeordnet werden.

Zerstörende Abplatzungen, insbesondere bei dünnen Stahlbetonbauteilen (kleine Deckendicken, schmale Stegdicken bei profilierten Balken) werden durch die tabellierten Mindestabmessungen und die Randbedingungen zu den Tabellen der DIN 4102-4 ausgeschlossen.

Die Angaben in DIN 4102-4 gelten nur in brandschutztechnischer Sicht. Aus den für die Bauteile gültigen kalten Konstruktionsnormen können sich weitergehende Anforderungen ergeben – z. B. hinsichtlich Mindestabmessungen, Betondeckung der Bewehrung usw.

6.4.3 Einfluss der europäischen Harmonisierung

In DIN 4102-4 werden etwa 160 nationale Produktnormen undatiert zitiert, damit etwaige Folgeausgaben direkt in DIN 4102-4 einfließen können [6.13]. Die europäischen Produktnormen sind im Gegensatz zu den nationalen Normen in der Regel Anforderungsnormen, wobei es ungewiss ist, in wie weit ihre Aussagen hinsichtlich des Brandverhaltens von Baustoffen mit den Aussagen der nationalen Produktnormen übereinstimmen. Die Aussagen von DIN 4102-4 sind also nicht direkt auf die neuen europäischen Produkte übertragbar. In vielen Fällen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die möglichen Änderungen aufgrund der europäischen Produktnormen eher geringe Auswirkungen haben. Zum Teil können zur Absicherung Vergleichsversuche erforderlich sein [6.14].

Da eine große Anzahl europäischer Produktnormen über einen längeren Zeitraum veröffentlicht wurde und wird, wäre die DIN 4102-4 ständig zu überarbeiten und anzupassen. Weiterhin wäre durch Prüfung nachzuweisen, dass die europäischen Produktnormen ein vergleichbares Sicherheitsniveau bezüglich der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen ergeben. Für den Übergang von nationalen zu europäischen Produktnormen wurde im zuständigen Arbeitsausschuss beschlossen, als praktikable Zwischenlösung eine Änderung A1 zu DIN 4102-4 [6.1] zu erarbeiten. Neben einer Reihe von notwendigen Korrekturen und Ergänzungen, z. B. die Übernahme der brandschutztechnischen Bemessungsregeln für hochfesten Beton aus [6.15], wurden in DIN 4102-4A1 alle relevanten normativen Verweisungen auf die letzten gültigen nationalen Normen datiert. Damit entfallen die Aussagen der DIN 4102-4 für Bauarten mit diesen Produkten, wenn sie durch Produkte auf Basis von europäischen Produktspezifikationen abgelöst werden. Für diese Bauarten werden dann Verwendbarkeitsnachweise nach Bauregelliste erforderlich.

Für die brandschutztechnische Bemessung mit DIN 4102 sind nach dem derzeitigen Stand die Basisnorm DIN 4102-4, die Änderung DIN 4102-4A1 und – insbesondere, wenn der Lastausnutzungsgrad von Bedeutung ist – die Anwendungsnorm DIN 4102-22 anzuwenden.

Längerfristig ist die Ausgabe einer konsolidierten Fassung von DIN 4102-4 vorgesehen, um die ursprünglich vorhandene Anwenderfreundlichkeit der Norm wieder herzustellen. Die konsolidierte Fassung von DIN 4102-4 soll die Inhalte der Normenteile 4102-4/A1 und 4102-22 sowie zwischenzeitlich erforderliche Überarbeitungen und Korrekturen, insbesondere zur Stützenbemessung für Betonbauteile und zum Mauerwerk, enthalten. Außerdem wird sie den Übergang von nationalen zu europäischen Produktnormen regeln.

6.5 Nachweise nach den Brandschutzteilen der Eurocodes

6.5.1 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. 1997 und 1998 wurden die Brandschutzteile der Eurocodes 1 bis 6 und 9 (EC 1 bis EC 6 und EC 9) erstmals in Deutschland als Vornormen veröffentlicht. Im September 2003 wurde der Eurocode 1 Teil 1-2 als DIN EN 1991-1-2 ausgegeben. Die Brandschutzteile der baustoffbezogenen Eurocodes (EC 2-1-2 bis EC 6-1-2 und EC 9-1-2) wurden als DIN EN-Normen in den Jahren 2006 und 2007 veröffentlicht:

EC 1-1-2	DIN EN 1991-1-2	Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke [6.2]
EC 2-1-2	DIN EN 1992-1-2	Tragwerksbemessung für Stahlbeton- und Spannbetontragwerke [6.3]
EC 3-1-2	DIN EN 1993-1-2	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten [6.4]
EC 4-1-2	DIN EN 1994-1-2	Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton [6.5]

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

EC 5-1-2	DIN EN 1995-1-2	Bemessung und Konstruktion von Holzbauten [6.6]
EC 6-1-2	DIN EN 1996-1-2	Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten [6.7]
EC 9-1-2	DIN EN 1999-1-2	Berechnung und Bemessung von Aluminiumtragwerken [6.8] ¹

Zurzeit werden die entsprechenden Nationalen Anhänge erarbeitet, die für die Anwendung der Eurocodes erforderlich sind. Die Veröffentlichung der Nationalen Anhänge erfolgt im Frühjahr 2009 als Normenentwürfe, zu denen die Praxis bis Mitte 2009 Stellung nehmen kann. Anschließend sollen die Eurocodes und ihre Nationalen Anhänge in die Musterliste der Technischen Baubestimmungen übernommen und durch Veröffentlichung in den Ministerialblättern der Bundesländer baurechtlich eingeführt werden.

Die Brandschutzteile der Eurocodes 2 bis 6, Teil 1-2 [6.3 bis 6.7] behandeln die Bemessung von Bauteilen und Tragwerken für den Brandfall mit Methoden des passiven, konstruktiven (baulichen) Brandschutzes, Methoden des aktiven Brandschutzes sind nicht erfasst.

Die Bemessungsregeln in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 bis 6 gelten nur für die im Anwendungsbereich der Norm genannten Baustoffe und Baustoffgüten. Sollen andere Baustoffe oder Baustoffgüten verwendet werden, z. B. ultrahochfester Beton mit einer Zylindruckfestigkeit größer 100 N/mm², muss deren brandschutztechnische Eignung durch Brandversuche nachgewiesen werden.

Auf die brandschutztechnische Bemessung nach Eurocode 6 Teil 1-2 wird im Folgenden nicht näher eingegangen. Das für die Brandschutzbemessung erforderliche Normenpaket aus „kaltem“ und „heißen“ Eurocode zusammen mit den Nationalen Anhängen wird nach heutigem Zeitplan im Laufe des Jahres 2010 veröffentlicht. Bis dahin gilt für die brandschutztechnische Bemessung von Mauerwerk die jeweils gültige Fassung der DIN 4102 -4.

6.5.2 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) [6.16] 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.

Bezüglich der individuellen Leistungsanforderungen auf der Basis von Naturbränden und der allgemeinen Berechnungsverfahren wird in den NA eine vorherige Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde und eine Prüfung nach dem Vier-Augen-Prinzip verlangt.

¹ Auf die brandschutztechnische Bemessung von Aluminiumkonstruktionen wird im Leitfaden nicht eingegangen, da das grundsätzliche Vorgehen sehr ähnlich ist wie für Stahlbauteile.

Alle Regelungen in den Eurocodes und den entsprechenden Nationalen Anhängen können im bauaufsichtlichen Verfahren grundsätzlich erst dann eingesetzt werden, wenn die Eurocodes inkl. Nationale Anhänge in den Listen der Technischen Baubestimmungen der Bundesländer aufgenommen worden sind (voraussichtlich Ende 2010). Bis zu diesem Zeitpunkt ist eine Anwendung der Eurocodes im Einzelfall nach Abstimmung mit der Baugenehmigungsbehörde möglich.

6.5.3 Tabellarische Daten

Die Nachweisverfahren mittels tabellarischer Daten beschränken sich in der Regel darauf, die Querschnittsabmessungen oder Bekleidungsdicken eines Bauteils mit Werten zu vergleichen, die nach Brandversuchsergebnissen zum Erreichen der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer erforderlich sind. Sie entsprechen damit weitestgehend den Bemessungstabellen der DIN 4102-4.

Bemessungstabellen sind in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 und 4 enthalten, im Brandschutzteil des Eurocodes 5 werden die erforderlichen Grundlagen für die Erstellung von Bemessungshilfen bereit gestellt [6.17], der Brandschutzteil des Eurocodes 3 enthält nur rechnerische Nachweisverfahren.

Die Bemessungstabellen sind sehr ähnlich aufgebaut wie die entsprechenden Tabellen in DIN 4102-4. Sie 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- undträgern 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 wird 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.

In Eurocode 4 Teil 1-2 enthalten die normativen Anhänge G und H Traglastdiagramme für Verbundstützen mit teilweise einbetonierte Querschnitt und für Verbundstützen mit beton gefülltem Querschnitt. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse von Berechnungen mit allgemeinen oder vereinfachten Rechenverfahren. Es ist zu beachten, dass eine Extrapolation über die untersuchten Bereiche hinaus nicht zulässig ist.

6.5.4 Vereinfachte Rechenverfahren

Mit den vereinfachten Rechenverfahren 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.

Mit dem in Eurocode 2 Teil 1-2, Anhang B.2 enthaltenen und im Nationalen Anhang für die Anwendung zugelassenen vereinfachten Rechenverfahren 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 6.5). Durch die Reduzierung des Betonquerschnitts werden die äußeren, dem Brand direkt ausgesetzten 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 [6.18] geführt werden.

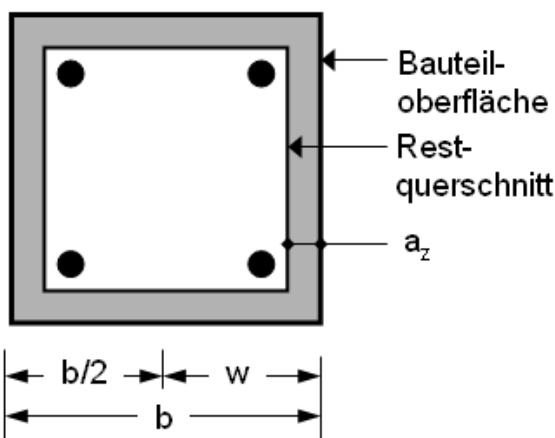


Bild 6.5 Restquerschnitt einer 4-seitig brandbeanspruchten Stahlbetonstütze nach Eurocode 2 Teil 1-2

Der reduzierte Bauteilquerschnitt und die temperaturabhängige Abminderung der Festigkeitsbeiwerte können für rechteckförmige oder aus Rechtecken zusammengesetzte Querschnittsformen mit Hilfe der in Eurocode 2 Teil 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 Rechenverfahren zur Berechnung der „heißen“ Tragfähigkeit von Einfeldträgern und durchlaufenden Balken sowie von Decken ist im informativen Anhang E des Eurocodes 2 Teil 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 Teil 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 Teil 1-2 entsprechen.

Die vereinfachten Rechenverfahren in 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 Teil 1-2 im Anhang 1 ein vereinfachtes Nachweisverfahren für die Feuerwiderstandsklasse R 90.

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:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (6.1)$$

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.

$$\theta_{a,max} \leq \theta_{cr} \quad (6.2)$$

Zur Berechnung der Stahltemperaturen von unbekleideten und bekleideten Querschnitten im Gebäudeinneren werden in Eurocode 3 Teil 1-2 Gleichungen angegeben, mit denen die Temperaturerhöhung $\Delta\Theta_{a,t}$ im Zeitintervall Δt ermittelt wird. In [6.19] sind Näherungsgleichungen angegeben, mit denen die Bauteiltemperaturen in Abhängigkeit von der Branddauer und dem Profilfaktor bei Beanspruchung nach der Einheitstemperaturzeitkurve ermittelt werden können (Bild 6.6). Stahltemperaturen außerhalb eines Gebäudes können nach Eurocode 1 Teil 1-2, Anhang B ermittelt werden.

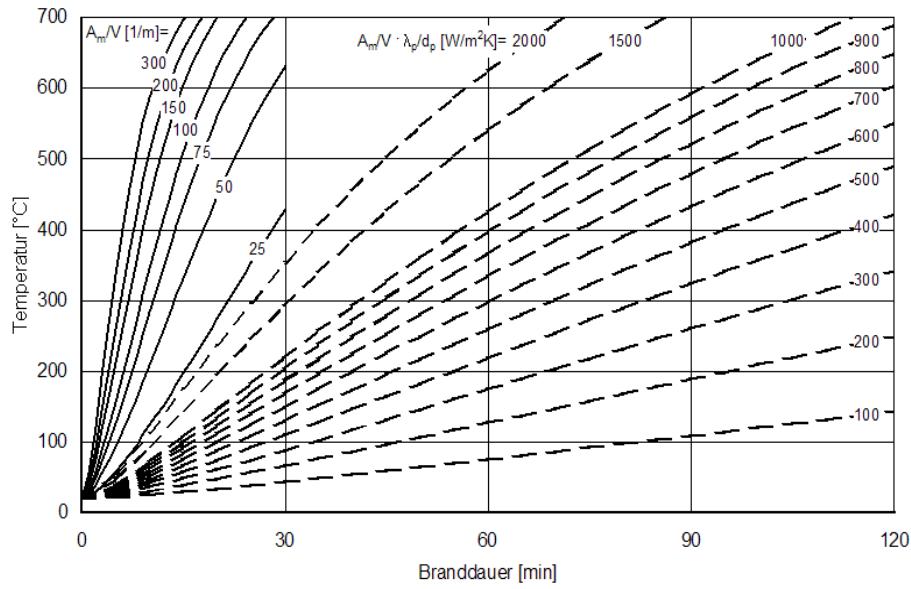


Bild 6.6 Temperaturen bei ETK-Bearbeitung in ungeschützten (A_m/V) und bekleideten Stahlprofilen ($A_p/V \cdot \lambda_p/d_p$) (nach [6.19])

Die kritische Stahltemperatur kann in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad bestimmt werden. Der Ausnutzungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis von Einwirkungen und Tragwiderstand zu Brandbeginn ($t = 0$):

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,t=0}} = \frac{\eta_{fi}}{\gamma_{M,20^\circ C}} = \frac{\eta_{fi}}{1,1} \quad (6.3)$$

Auf der sicheren Seite liegend darf der Abminderungsfaktor nach Eurocode 3 Teil 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 °C. Außerdem, 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

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1\right) + 482 \quad (6.4)$$

mit

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (6.5)$$

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

In Eurocode 4 Teil 1-2 werden vereinfachte Berechnungsverfahren für geschützte und ungeschützte Verbunddecken, Verbundträger mit und ohne Kammerbeton, Stahlträger mit Kammerbeton und Verbundstützen bereitgestellt.

Das in Eurocode 4 Teil 1-2 (Anhang D) enthaltene vereinfachte Berechnungsverfahren für die Bemessung von Verbunddecken basiert auf [6.20]. 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 Momententragsfähigkeit 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 Biegemomententragsfähigkeit wird über entsprechende Abminderung der Materialfestigkeiten infolge der Erwärmung reduziert. Zurzeit werden Verbunddecken in Deutschland über Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) geregelt, als deren Grundlage auch Brandprüfungen durchgeführt werden. Vergleichsrechnungen [6.21] haben ergeben, dass das Verfahren in Eurocode 4 Teil 1-2 gegenüber den abZ zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führt.

In Eurocode 4 Teil 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, Bestonstahlbewehrung 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 Eurocode 4 Teil 1-2 Anhang E detaillierte Angaben gemacht.

In Eurocode 4 Teil 1-2 (Anhang G) ist ein vereinfachtes Rechenverfahren 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 [6.22]. Der Schlankheitseinfluss wird durch spezielle, für den Brandbeanspruchungszustand gültige Knickspannungskurven berücksichtigt [6.23].

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

ren, dem Feuer direkt ausgesetzten Querschnittsbereichs beeinflusst. Für die brandschutztechnische Bemessung tragender Holzbauteile werden zwei vereinfachte Rechenverfahren angeboten, die beide von der Abbrandrate v ausgehen und damit eine bestimmte Abbrandtiefe d nach t Minuten Brandbeanspruchung berechnen. Die Abbrandrate wird in Eurocode 5 Teil 1-2, Tabelle 3.1, in Abhängigkeit von der Holzsorte (Vollholz, Brettschichtholz, u. a.) vorgegeben.

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 6.7). Der Betrag Δd berücksichtigt vereinfachend die infolge der erhöhten Temperaturen abzumindernden Werkstoffeigenschaften. Der Tragfähigkeitsnachweis für den effektiven Restquerschnitt darf dann mit den Festigkeits- und Verformungseigenschaften bei Normaltemperatur durchgeführt werden. Der Betrag Δd wird in Eurocode 5 Teil 1-2, Tabelle 4.1, als zeitabhängige Größe definiert. Dabei ist zusätzlich zu berücksichtigen, ob die beflamme Oberfläche geschützt oder ungeschützt dem Feuer ausgesetzt wird.

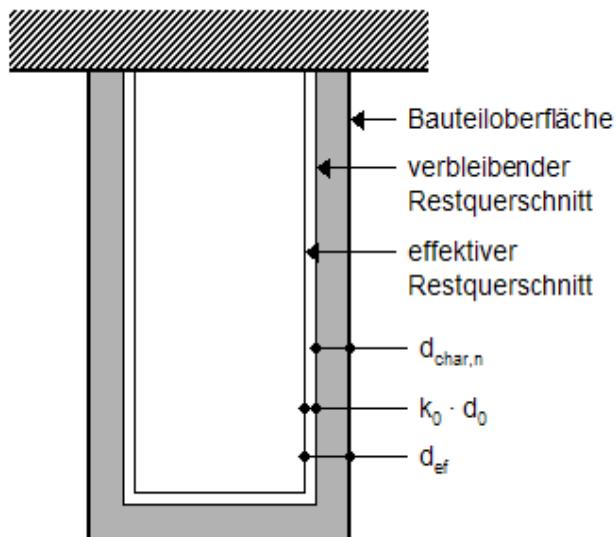


Bild 6.7 Restquerschnitt für stabförmige Holzbauteile

Das T_m -Verfahren bzw. die Methode mit reduzierten Werkstoffeigenschaften kann für Holzbauteile unter Normbrandbedingungen angewendet werden, die unter Biege-, Druck- oder Zugbeanspruchung stehen. Die brandschutztechnische Bemessung wird mit dem verbleibenden Restquerschnitt nach Bild 6.7 durchgeführt. Für die temperaturabhängige Reduzierung der Biege-, Druck- und Zugfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls werden Rechenfunktionen in Abhängigkeit vom Verhältnis des beflammt Umfangs des Restquerschnitts zur Fläche des Restquerschnitts angegeben.

Im informativen Anhang E zum Eurocode 5 Teil 1-2 sind für raumabschließende Konstruktionen Näherungsverfahren zum Nachweis der Temperaturerhöhung $\Delta T \leq 140$ K und $\Delta T \leq 180$ 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 6.8 zu berücksichtigen.

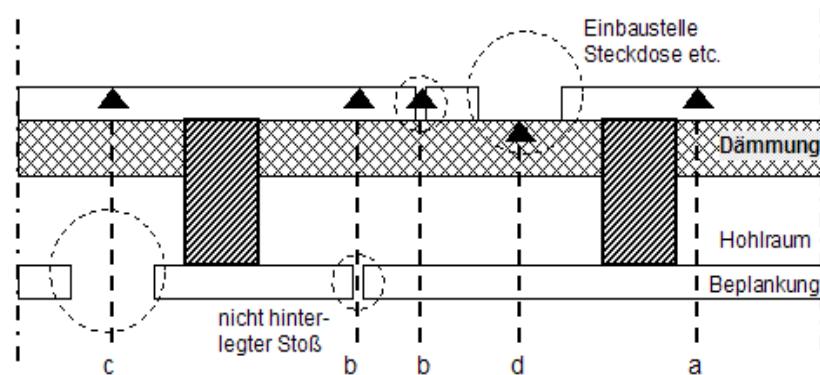


Bild 6.8 Temperaturfluss in den Schnitten a – d durch raumabschließende Holzkonstruktion

Zusammenfassung: Mit den vereinfachten Rechenverfahren der Brandschutzteile der Eurocodes 2 bis 5 kann die Tragfähigkeit der Bauteile unter Normbrandbeanspruchung für eine vorgegebene Feuerwiderstandsdauer ermittelt werden. 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 das Abplatzverhalten bei Stahlbetonbauteilen.

6.5.5 Allgemeine Rechenverfahren

6.5.5.1 Allgemeines

Allgemeine Rechenverfahren können für den brandschutztechnischen Nachweis von Einzelbauteilen, Teil- und Gesamtragwerken 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.

Der brandschutztechnische Nachweis besteht aus einer thermischen und einer mechanischen Analyse. Die thermische Analyse kann entkoppelt von der mechanischen Analyse erfolgen, da die Ergebnisse der mechanischen Analyse keinen bzw. einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Erwärmung der Bauteile haben.

- 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 3.2 vorgegeben oder nach Kapitel 5 des Leitfadens ermittelt werden. 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, behinderten thermischen Verformungen (Zwangskräfte und -momente) sowie gegebenenfalls aus nichtlinearen geometrischen Einflüssen berücksichtigt werden. Auf Seiten des Bauteilwiderstandes müssen die Einflüsse aus dem thermo-mechanischen Baustoffverhalten und den thermischen Dehnungen berücksichtigt werden. Das Tragverhalten nach dem Abkühlen des Tragwerks, die sog. Resttragfähigkeit im wiedererkalteten Zustand, braucht bei der Bemessung nicht berücksichtigt zu werden.

Allgemeine Rechenverfahren dürfen nur nach Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde bzw. dem Prüfingenieur oder Prüfsachverständigen (nach Landesrecht) für brandschutztechnische Nachweise von Einzelbauteilen, Tragwerken und Gesamttragwerken angewendet werden. Die Nachweise sollten von einem hierfür qualifizierten Prüfingenieur oder Prüfsachverständigen geprüft werden.

6.5.5.2 Einwirkungen für die Temperaturberechnung

6.5.5.2.1 Allgemeine Regeln

Die thermischen Einwirkungen auf Bauteile werden in Eurocode 1 Teil 1-2, Abschnitt 3.1 durch den Netto-Wärmestrom [W/m^2] in die Oberfläche des Bauteils gegeben, der sich unter Berücksichtigung von Konvektion und Strahlung gemäß Gleichung (6.6) aus einem konvektiven Anteil $\dot{h}_{\text{net},c}$ und einem radialen Anteil $\dot{h}_{\text{net},r}$ zusammensetzt.

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net},c} + \dot{h}_{\text{net},r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.6)$$

mit:

$$\dot{h}_{\text{net},c} \quad \text{nach Gleichung (6.7),}$$

$$\dot{h}_{\text{net},r} \quad \text{nach Gleichung (6.8).}$$

Der konvektive Anteil des Netto-Wärmestroms wird berechnet mit:

$$\dot{h}_{\text{net},c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.7)$$

wobei

α_c Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

θ_g Heißgastemperatur in der Umgebung des Bauteils [°C].

Für die Einheitstemperaturzeitkurve 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 $\alpha_c = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 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:

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_{\text{res}} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (6.8)$$

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 [°C]

θ_m Oberflächentemperatur des Bauteils [°C]

$5,67 \cdot 10^{-8}$ Stefan-Boltzmann-Konstante [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$].

In der Regel darf vereinfachend der Faktor $\Phi = 1,0$ und die Strahlungstemperatur θ_r gleich der Heißgasttemperatur 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: $\varepsilon_m = \varepsilon_{\text{res}} = 0,4$

**) Für beschichtete und verdeckte (z. B. verrußte) Oberflächen: $\varepsilon_m = \varepsilon_{\text{res}} = 0,7$

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

Gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 sollte bei der Anwendung von Naturbrandmodellen nach Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2 der Wärmeübergangskoeffizient zu $\alpha_c = 35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gesetzt werden. In [6.24] 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 Eurocode 1 Teil 1-2 angegebenen Werte der Emissivität für standardisierte Temperaturzeitkurven näherungsweise auch für natürliche Brände anzuwenden.

6.5.5.2.2 Nominelle Temperaturzeitkurven

In Eurocode 1 Teil 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 Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach Gl. (6.9), die Hydrokarbon-Brandkurve nach Gl. (6.10) oder die Außenbrandkurve nach Gl. (6.11) angenommen werden:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad [\text{°C}] \quad (6.9)$$

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \quad [\text{°C}] \quad (6.10)$$

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20 \quad [\text{°C}] \quad (6.11)$$

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 3 [6.1].

6.5.5.2.3 Naturbrandmodelle

6.5.5.2.3.1 Allgemeines

Der 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 [6.25].

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 Kaltgaschicht mit jeweils zeitabhängiger Schichtdicke und gleichmäßiger zeitabhängiger Temperatur ausgehen,
- Feldmodelle, die mit den Verfahren der Fluid-Dynamik die Temperaturentwicklung in einem Brandabschnitt in Abhängigkeit von Ort und Zeit berechnen.

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. 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 Wärmefreisetzungsraten wird in Kapitel 4 des vorliegenden Leitfadens beschrieben. Der Bemessungsbrand lässt sich auf diese Weise physikalisch eindeutiger beschreiben als durch Vorgabe von Temperaturzeitkurven.

6.5.5.2.3.2 Vereinfachte Naturbrandmodelle

Vereinfachte Naturbrandmodelle basieren auf bestimmten physikalischen Größen, die nur in bestimmten 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 die Parameterkurven Defizite auf und werden in der Literatur kritisch diskutiert [6.25]. Aus diesem Grunde wird 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 [6.26], [6.27] angegeben, welches im vorliegenden Leitfaden in Kapitel 4.4.7.3.3 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.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

Das in Eurocode 1 Teil 1-2 Anhang C angegebene Modell für lokale Brände basiert auf dem Plumemodell von Heskstad (siehe Kapitel 5) und wird im Nationalen Anhang zu Eurocode 1 Teil 1-2 für Deutschland freigegeben [6.25].

6.5.5.2.3.3 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 Feldmodelle 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.

6.5.5.3 Thermische Analyse

Grundlage für die Berechnung der Temperaturverteilung in Bauteilen ist die Differentialgleichung von Fourier (Gl. (6.12)) zur Beschreibung der instationären Wärmeleitung in Festkörpern. Dabei wird vorausgesetzt, dass keine Wärmequellen oder -senken im Körperinneren vorhanden sind.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \quad (6.12)$$

mit

T Temperatur [K]

t Zeit [s]

a $= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ Temperaturleitzahl [m^2/s]

λ Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{mK})$]

ρ Rohdichte [kg/m^3]

c_p spezifische Wärme [$\text{J}/(\text{kgK})$]

x, y, z Raumkoordinaten [m]

Eine analytische Lösung für Gl. (6.12) 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 6.9) berücksichtigt werden. Damit ist die Zielgröße der Berechnung, die Temperatur, von temperaturabhängigen Eingangsparametern abhängig. Zur Lösung werden numerische Methoden wie z. B. die Finite Element Methode (FEM) oder die Methode der Finiten Diffe-

renzen mit Integrationsverfahren über die Zeitschritte eingesetzt. Für baupraktische Fälle werden dabei folgende Vereinfachungen getroffen:

- Die Temperaturausbreitung in Bauteillängsrichtung wird vernachlässigt. In stabförmigen Bauteilen wird die Temperaturausbreitung 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.

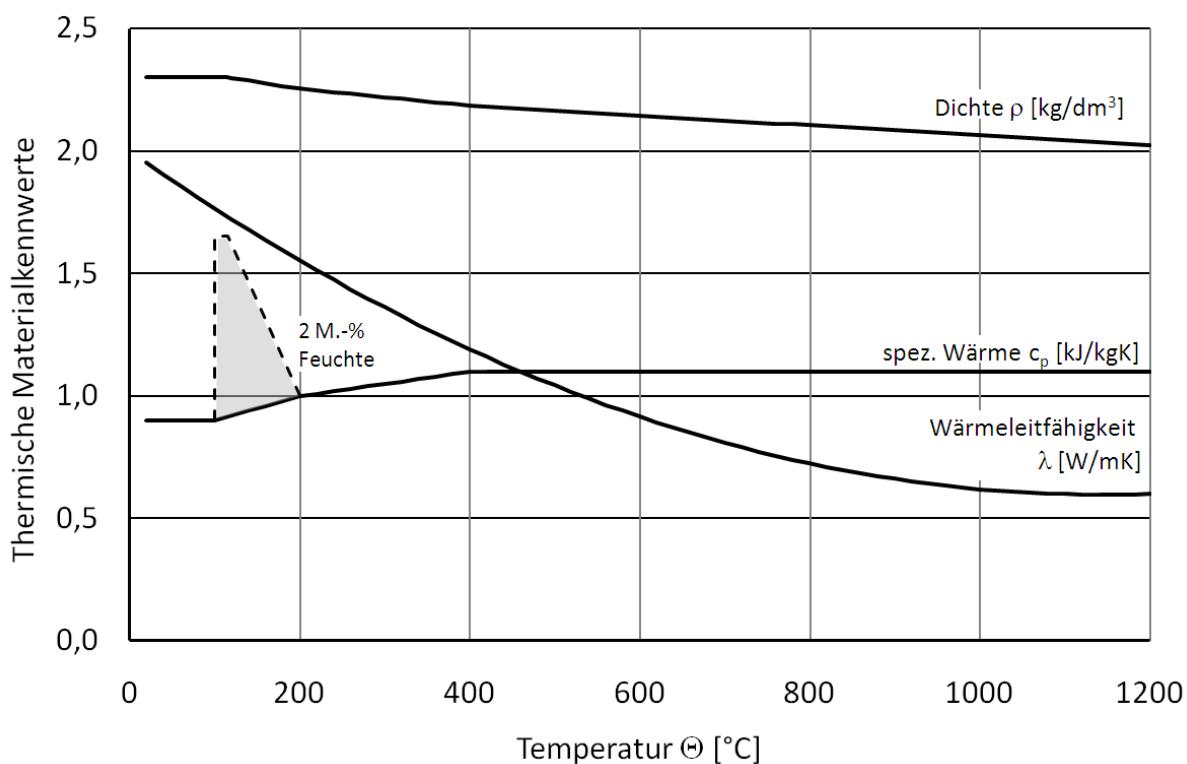


Bild 6.9 Rechenwerte der temperaturabhängigen thermischen Materialkennwerte von Beton

In die Berechnung der Temperaturverteilung gehen die Kennwerte für die thermischen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit λ , spezifische Wärme c_p und Rohdichte ρ als charakteristische Größen X_k mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi}$ ein. Dabei muss unterschieden werden, ob eine Vergrößerung des Kennwertes die Sicherheit erhöht – dann gilt Gl. (6.13) – oder die Sicherheit verkleinert – hierfür gilt Gl. (6.14):

$$X_{fi,d} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.13)$$

$$X_{fi,d} = X_{k,\theta} \cdot \gamma_{M,fi} \quad (6.14)$$

Die Kennwerte X_k werden im Allgemeinen als 5 %-Fraktile definiert, der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi}$ wird in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 bis 5 und in den nationalen Anhängen zu $\gamma_{M,fi} = 1,0$ festgesetzt.

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. Grundsätzlich sollten die Angaben aus den Handbüchern der Programme beachtet werden.

- Bei der Diskretisierung der Bauteilquerschnitte sollte die Größe der finiten Elemente der Temperaturverteilung angepasst werden. Im Bereich großer Temperaturgradienten – z. B. an den beflammteten Querschnittsrändern – sollte eine feinere Diskretisierung als im Querschnittsinneren vorgenommen werden.
- Elementgrößen mit maximal 2 - 3 cm Kantenlänge sollten nicht überschritten werden. 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.
- Symmetrieverbedingungen hinsichtlich der Beflammmung sollten ausgenutzt werden, um die Anzahl der Elemente zu begrenzen.
- Die Diskretisierung der thermischen und mechanischen Analyse sollten auf einander abgestimmt sein.
- Das Zeitintervall zur Berechnung der Temperaturverteilung sollte bei Stahlbeton-, Verbund- und unbekleideten Stahlquerschnitten ca. 2 - 5 Minuten und bei bekleideten Stahlquerschnitten weniger oder gleich 1 Minute betragen.
- Für Stahlbetonquerschnitte mit praxisüblichem Bewehrungsgehalt darf die Bewehrung bei der thermischen Analyse vernachlässigt werden. Die Temperatur in der Achse des Bewehrungsstabes entspricht in etwa der Temperatur im ungestörten Beton [6.28].

6.5.5.4 Mechanische Einwirkungen

In 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 berück-

sichtigt zu werden, sofern sie das Tragverhalten nur geringfügig beeinflussen und/oder durch entsprechende Ausbildung der Auflager aufgenommen werden. Als indirekte Einwirkungen kommen Zwangskräfte und -momente in Stützen, rahmenartigen Tragwerken, durchlaufenden Balken/Trägern und Auswirkungen thermischer Ausdehnung auf Bauteile, die nicht vom Feuer beansprucht werden in Betracht.

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 Zwangbeanspruchungen, werden die Bemessungswerte allgemein aus den charakteristischen Werten durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_F und ggf. Kombinationsbeiwerten bei veränderlichen Einwirkungen bestimmt. Im Brandfall werden die ständigen Einwirkungen mit einem Teilsicherheitsbeiwert γ_{GA} erhöht, während der Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen – wegen der Seltenheit des Brandereignisses – grundsätzlich zu 1,0 gesetzt wird.

Bei Kombinationen von ständigen und veränderlichen Einwirkungen dürfen die veränderlichen Einwirkungen mit Kombinationsbeiwerten nach Tabelle 6.2 für die dominierende Einwirkung $\psi_{1,1}$ und für weitere veränderliche Einwirkungen $\psi_{2,i}$ reduziert werden. Damit werden „häufige“ bzw. „quasi-ständige“ Bemessungswerte der Einwirkungen definiert, deren Auftreten gleichzeitig mit dem seltenen Brandereignis real zu erwarten ist.

Mit der Kombinationsregel für außergewöhnliche Ereignisse wird die maßgebliche Beanspruchung $E_{fi,d,t}$ während der Brandeinwirkung nach Gl. (6.15) festgelegt:

$$E_{fi,d,t} = \sum \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (6.15)$$

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 [6.29] (siehe Tabelle 6.2)

Als Vereinfachung dürfen die Einwirkungen während der Brandbeanspruchung direkt aus den Einwirkungen bei Normaltemperatur nach Gl. (6.16) ermittelt werden:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (6.16)$$

mit

- E_d Bemessungswert der Einwirkungen nach Eurocode 1 Teil 1, mit Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte für ständige und veränderliche Einwirkungen γ_G, γ_Q

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi} \quad (6.17)$$

Reduktionsfaktor, abhängig vom Verhältnis des Hauptwertes der veränderlichen Einwirkungen zur ständigen Einwirkung $\xi = Q_{k,1}/G_{k,1}$.

Tabelle 6.2 Kombinationsbeiwerte im Hochbau (Auszug aus [6.29, 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
Lagerfächen	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 6.10 zeigt die Auswertung von Gl. (6.17) mit Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$ für verschiedene Kombinationsbeiwerte $\psi_{1,1}$.

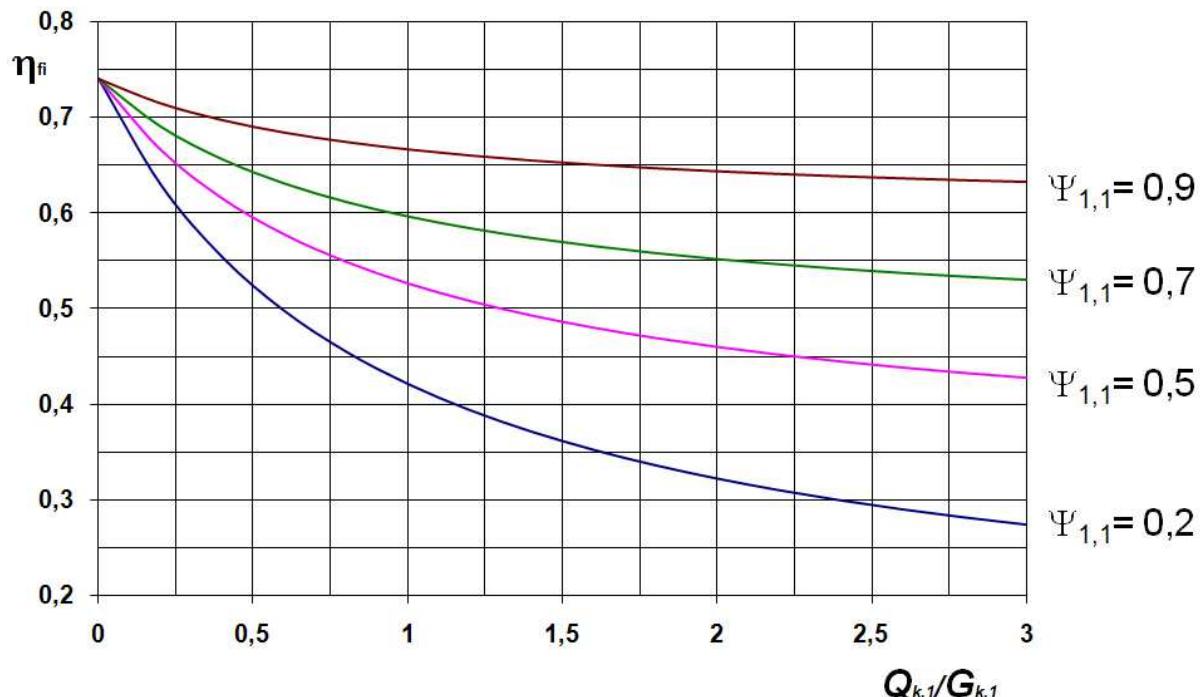


Bild 6.10 Reduktionsfaktor η_{fi} in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen ständiger und dominierender veränderlicher Einwirkung ($\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$)

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 der Eurocodes und NAD	Reduktionsfaktor η_{fi}
2	0,7
3 und 4	0,65
5	0,6 (Kategorie E: 0,7)

6.5.5.5 Mechanische Analyse

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 Abschnitt 6.5.5.3 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 Momentenbeanspruchung in Feldmitte $M_{E,fi,d}$ gegenübergestellt werden. Im brandschutztechnischen Nachweis wird $M_{E,fi,d} \leq M_{R,fi,d}$ nachgewiesen (Bild 6.11).

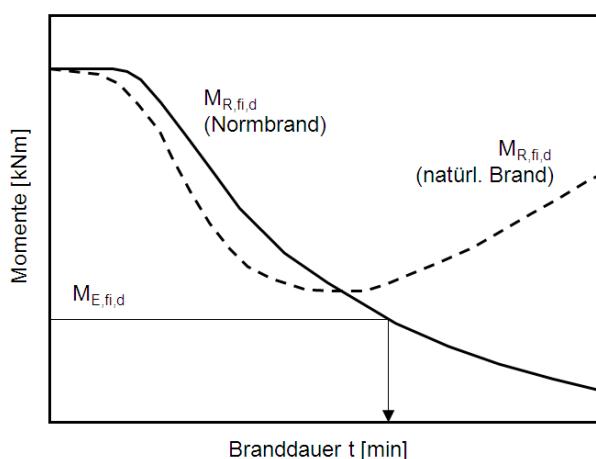


Bild 6.11 Prinzipieller Verlauf der Biegetragfähigkeit $M_{R,fi,d}$ und der Momentenbeanspruchung $M_{E,fi,d}$ bei einem statisch bestimmt gelagerten Balken

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.

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 6.12 temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Beton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen, in Bild 6.13 für kaltverformten Betonstahl (BSt 500 S) und in Bild 6.14 für Baustahl dargestellt. Bild 6.15 zeigt die thermischen Dehnungen für Beton, Betonstahl, Spannstahl und Baustahl.

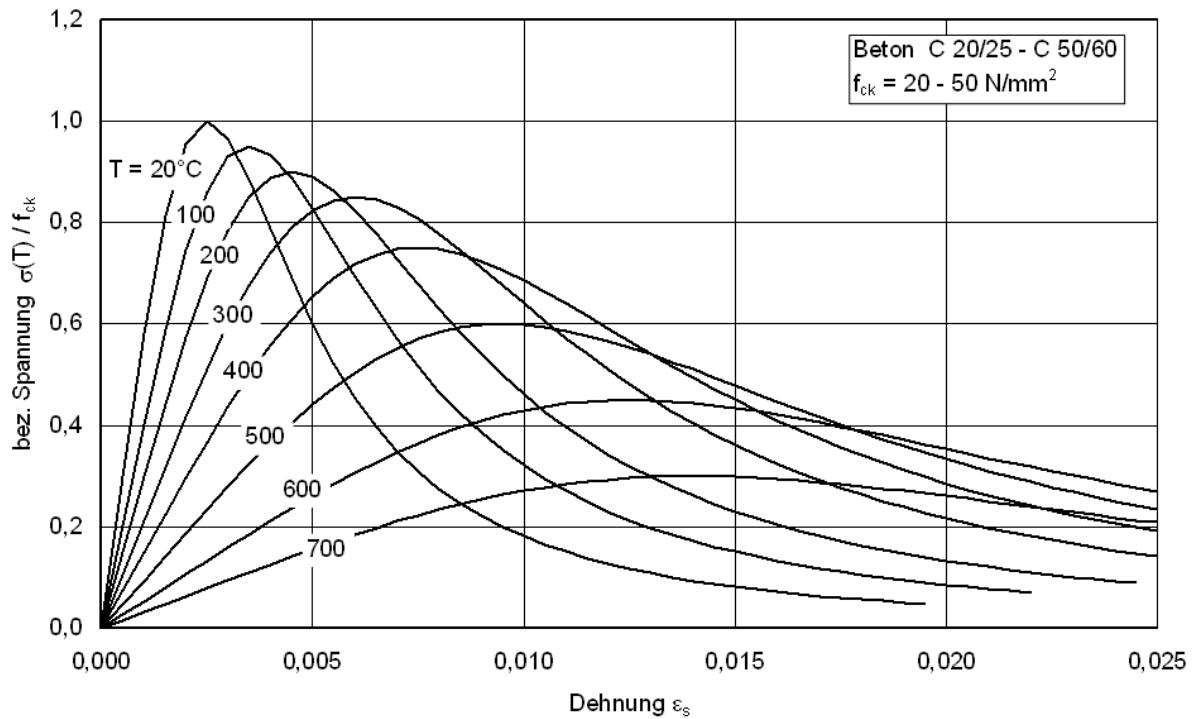


Bild 6.12 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Beton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen

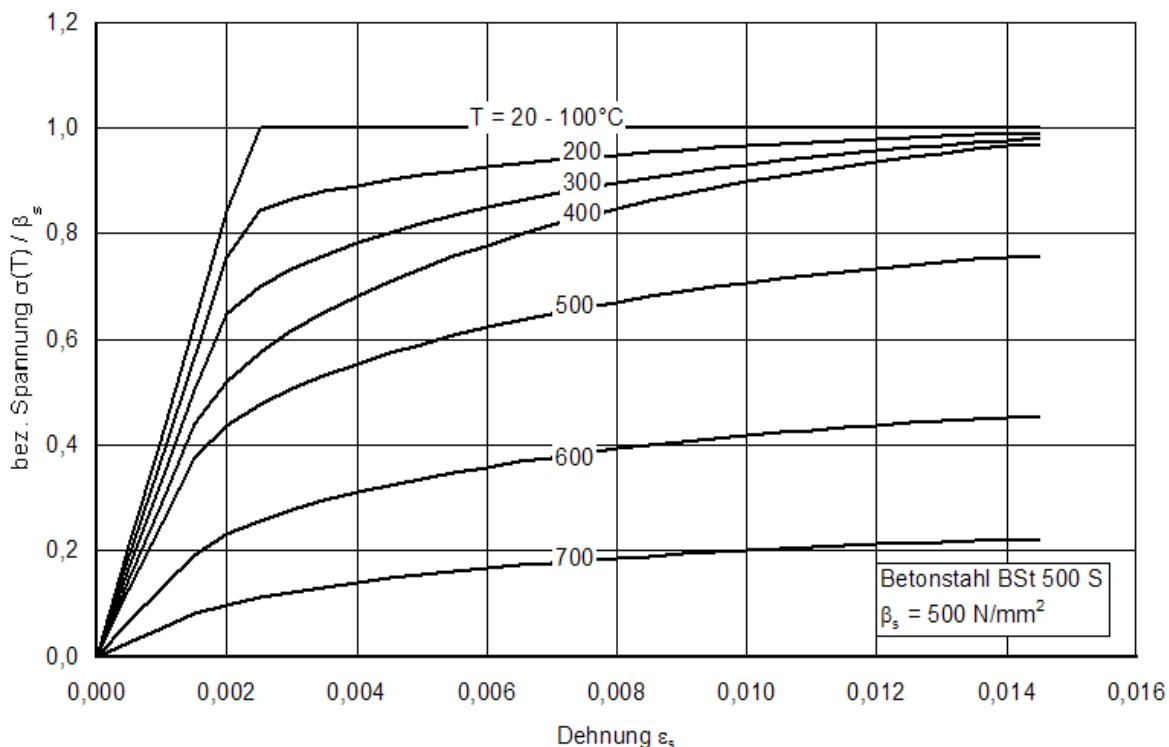


Bild 6.13 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von kaltverformtem Betonstahl (BSt 500 S)

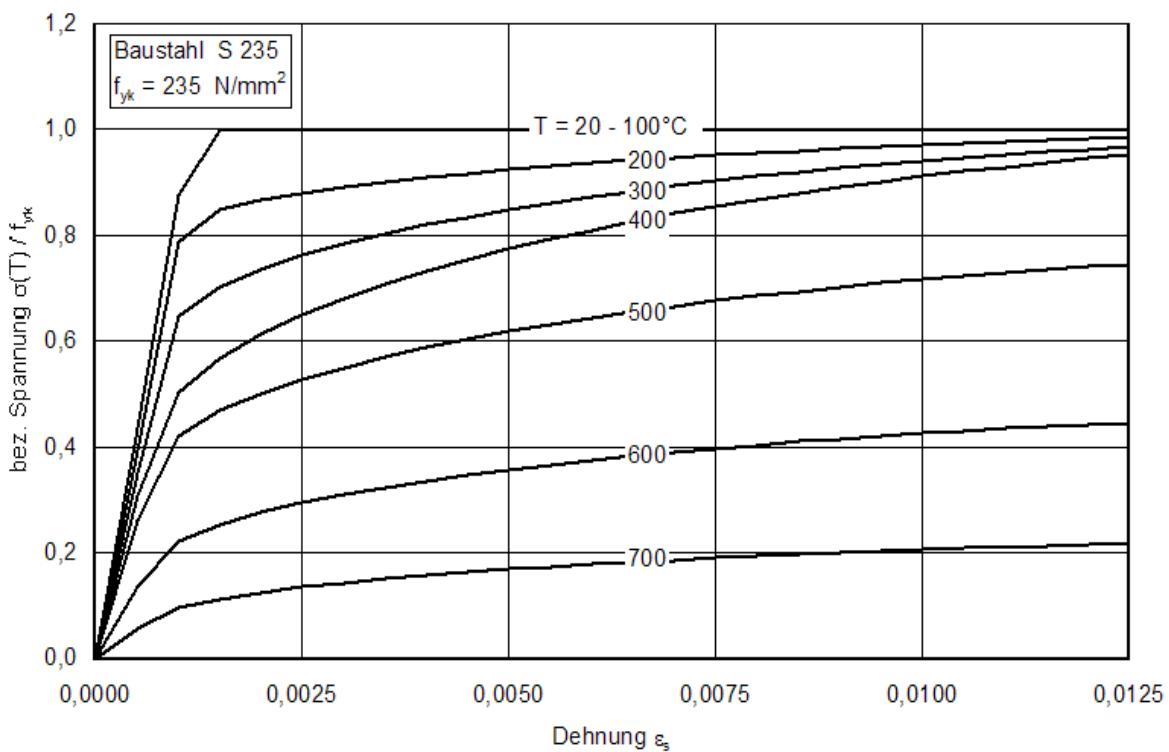


Bild 6.14 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Baustahl

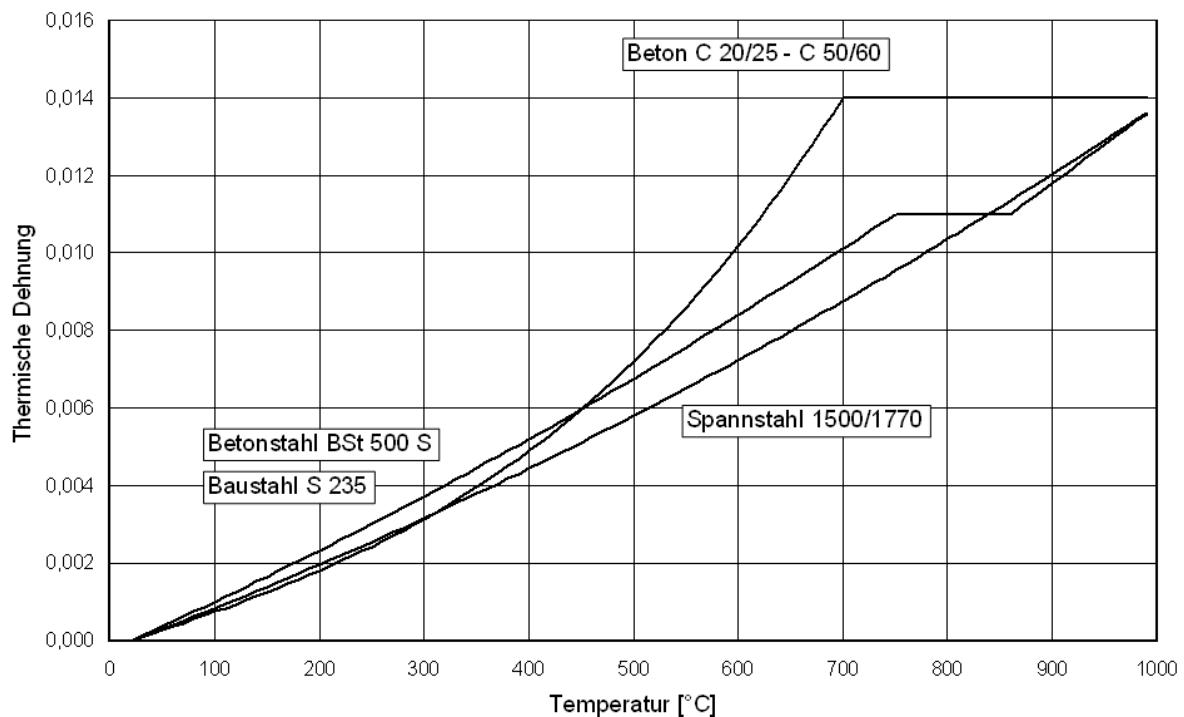


Bild 6.15 Thermische Dehnung von Beton, Betonstahl, Spannstahl und Baustahl

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. (6.18):

$$X_{fi,d} = k_\theta \cdot \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.18)$$

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 Eurocode 5 Teil 1-2 werden die Bemessungswerte der Festigkeit und des E-Moduls abweichend von Gl. (6.18) als 20 %-Faktile der Festigkeits- bzw. Steifigkeitseigenschaft bei Normaltemperatur, multipliziert mit dem Modifikationsbeiwert im Brandfall $k_{\text{mod},\text{fi}}$ und dividiert durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,\text{fi}} = 1,0$ festgelegt. Im Anhang B des Eurocodes 5 Teil 1-2 sind die Eingangsparameter für die thermischen und mechanischen Materialkennwerten von Holz zusammengestellt.

6.5.5.6 Abnehmende Bauteiltemperaturen

Die Brandbeanspruchungen nach Kapitel 5 des Leitfadens geben den Verlauf der Heißgastemperaturen für einen natürlichen Brandverlauf mit ansteigenden und abfallenden Temperaturen wieder. Als Folge der zurückgehenden Heißgastemperaturen kühlt der Bauteilquerschnitt zunächst nur außen, bei zunehmender Brändauer dann auch in weiter innen liegenden Querschnittsbereichen aus. Die instationäre Querschnittserwärmung wird zu einer instationären Querschnittsabkühlung. Für die rechnerische Erfassung der abnehmenden Bauteiltemperaturen müssen die thermischen Materialgesetze von Abschnitt 6.5.5.3 verändert werden. Beispielsweise ist der Verdampfungsvorgang des Porenwassers im Beton kein reversibler Vorgang, sodass die in Bild 6.9 angegebene Definition für die spezifische Wärmekapazität nur für mit der Zeit zunehmende Temperaturverläufe gilt.

Für abnehmende Bauteiltemperaturen muss mit irreversiblen thermischen Materialgesetzen gerechnet werden. In [6.30] wird zur Berechnung der abnehmenden Bauteiltemperaturen vorgeschlagen, vom Wendepunkt der Temperaturen (Punkt K in Bild 6.16) mit der an die maximale Temperatur gekoppelten Temperaturleitzahl a bis zur völligen Abkühlung zu rechnen.

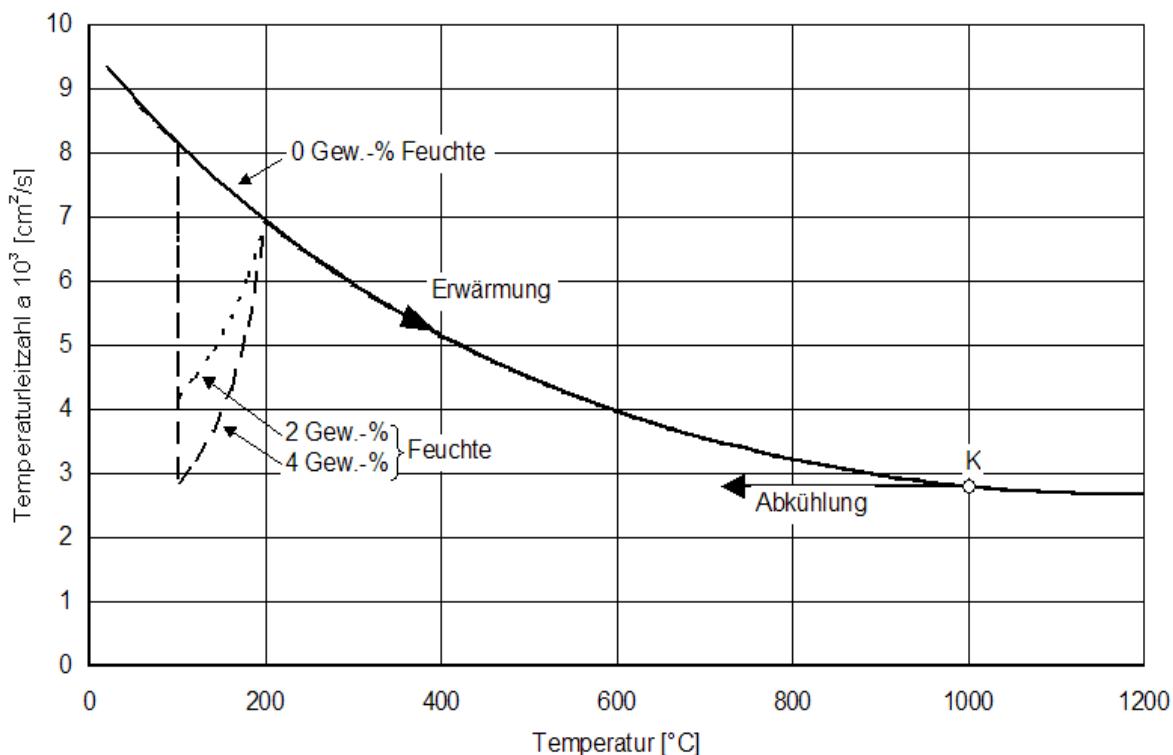


Bild 6.16 Temperaturleitzahl a von Normalbeton mit vorwiegend quarzitischen Zuschlägen für die Erwärmungs- und Abkühlphase

Die Auswirkungen der irreversiblen thermischen Materialkennwerte auf die Temperaturverteilung in einem quadratischen Betonquerschnitt mit $b = 200 \text{ mm}$ zeigt Bild 6.17. Dargestellt sind die Isothermen nach 60 Minuten Branddauer: die dicken Linien gelten mit Berücksichtigung, die dünnen Linien ohne Berücksichtigung der irreversiblen thermischen Materialkennwerte.

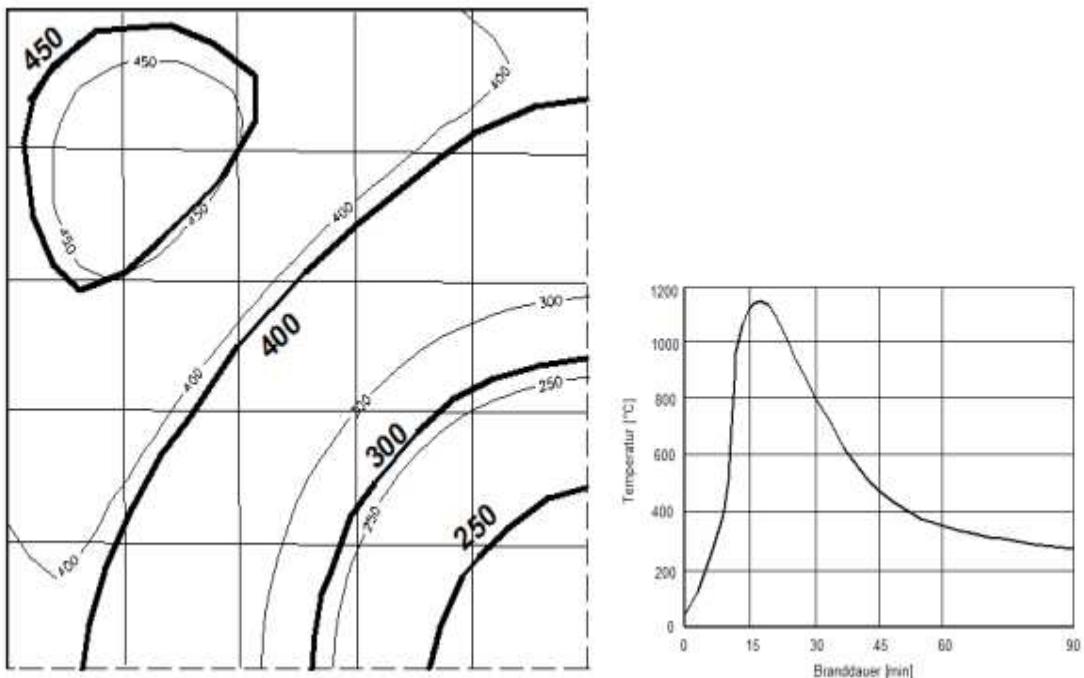


Bild 6.17 links: Isothermen nach 60 Minuten Branddauer mit (dick) und ohne (dünn) Berücksichtigung der irreversiblen thermischen Materialkennwerte; rechts: Heißgastemperaturen

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 [6.31]. 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 beflammteten 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 $T \approx 20^\circ\text{C}$ 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 ($\delta T/\delta t < 0$) enthalten die Brandschutzteile vom 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 Teil 1-2, Anhang C Spannungs-Dehnungsbeziehungen angegeben, die an natürliche Brände mit Abkühlphase angepasst sind. Der Scheitelwert der Betondruckfestigkeit wird bei Abkühlung in Abhängigkeit von der erreichten maximalen Temperatur reduziert. Bei diesem Näherungsansatz bleiben die während der Abkühlung auftretenden irreversiblen Stauchungen unberücksichtigt [6.32].

Rechenhinweise hinsichtlich der Verformungen und der thermischen Dehnungen bei abfallenden Temperaturen sind in den Eurocodes nicht enthalten. In [6.32] sind einige Messergebnisse von instationären Hochtemperatur-Kriechversuchen mit Betonproben veröffentlicht. Sie zeigen in Abhängigkeit von der erreichten maximalen Temperatur ausgeprägte irreversible bleibende Dehnungen. Bild 6.18 zeigt, dass bei Erwärmung auf ca. 800°C nach dem

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

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.

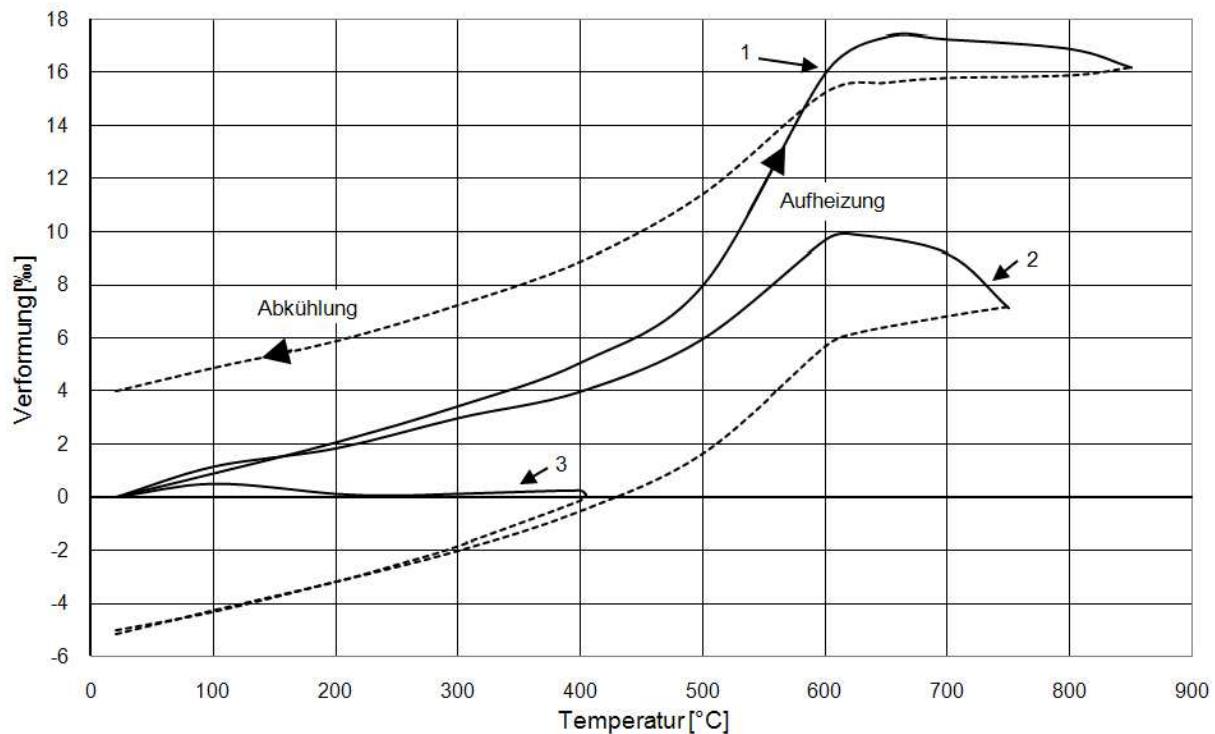


Bild 6.18 Dehnungen von Normalbeton nach dem Aufheizen und Abkühlen

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.

Hinsichtlich der Verformungen und der 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, die Verformungen können 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. Weiterhin muss bei der Festlegung der Bauteilabmessungen darauf geachtet werden, dass mögliche – jedoch nicht durch das allgemeine Rechenverfahren 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 Bekleidungen werden keine thermischen Stoffwerte angegeben, sondern es wird auf die entsprechenden Baustoffnormen verwiesen (die es jedoch als harmonisierte europäische Normen noch nicht gibt).

6.6 Beurteilung von Rechenprogrammen

6.6.1 Allgemeines

Für die rechnerische brandschutztechnische Auslegung von Bauteilen und Tragwerken durch allgemeine Rechenverfahren 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 Eurocode 1 Teil 1-2 eine auf [6.33] basierende systematische Vorgehensweise vorgeschlagen. Ziel ist es, die Anwendbarkeit der Programme auf die ingenieurmäßige brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken mittels allgemeiner Rechenverfahren 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 Zulassung von Programmen möglich. Beispielsweise sind Programme, die das Systemverhalten (Auflagerbedingungen, Belastung) nicht hinreichend genau erfassen, nicht für die brandschutzschutztechnische Bemessung von statisch unbestimmten und/oder stabilitätsgefährdeten Systemen geeignet. Die Programme können aber durch für die brandschutztechnische Bemessung von statisch bestimmten Biegebauteilen eingesetzt werden [6.34].

In [6.33] 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

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

- 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.

6.6.2 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.

6.6.3 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 [6.26] 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 [6.33] 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.

6.6.4 Testen durch Eichbeispiele

Mit Hilfe von Eichbeispielen werden programmberchnete und experimentell ermittelte Ergebnisse hinsichtlich ihrer Übereinstimmung geprüft. Dabei muss beachtet werden, dass das Experiment in der Regel einen Ausschnitt der „Wirklichkeit“ wiedergibt, da Versuchsergebnisse nur 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 4102-4 oder den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 und 4 verwendet werden, wenn alle Randbedingungen für die Tabellen bekannt sind. In [6.33] 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 Rechenverfahren abdecken zu können.

6.6.5 Toleranzen

Die zulässigen Abweichungen von den vorgegebenen Lösungen der Validierungs- und Eichbeispiele müssen sich an der stochastischen Modellunsicherheit orientieren. Für die Validierungsbeispiele können nur geringe Abweichungen akzeptiert werden. Für die Eichbeispiele muss bei der Beurteilung der Programme auf Grund der größeren Modellunsicherheit auch eine größere Toleranz in Kauf genommen werden.

In [6.33] wird für die Validierungsbeispiele eine tolerierbare Abweichung von 5 % vorgeschlagen. Bei einer differenzierten Betrachtung der Parameter in Abhängigkeit ihrer Sensitivität und ihres Einflusses auf die Berechnung der Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils kann es sinnvoll sein, für Validierungsbeispiele – je nach Parameter – auch unterschiedliche und geringere Toleranzen festzulegen.

Für Eichbeispiele, bei denen rechnerische und experimentelle Ergebnisse verglichen werden, wird in [6.33] eine Toleranz von 15 % vorgeschlagen. Werden die rechnerischen Ergeb-

nisse mit Ergebnissen aus Bemessungstabellen verglichen, sollte als unterer Wert für die tolerierbare Abweichung die Klassifizierungsgrenze der Feuerwiderstandsklasse (z. B. F 90) und als oberer Wert die Klassifizierungsgrenze der nächsten Feuerwiderstandsklasse (z. B. F 120) genommen werden.

6.6.6 Prüfmatrix

Die entwickelten Bewertungskriterien werden prägnant zusammengefasst in einer Prüfmatrix, welche gemäß Nationalem Anhang zu Eurocode 1 Teil 1-2 ein handhabbares Instrument zur Beurteilung der Eignung von Rechenprogrammen für die allgemeinen Rechenverfahren der Eurocodes sein kann.

Im Idealfall muss ein zu prüfendes Programm alle Beurteilungskriterien hinreichend genau erfüllen. Ein Programm, das nicht alle Beurteilungskriterien erfüllt, kann ggf. für Teilbereiche der brandschutztechnischen Bemessung mit allgemeinen Rechenverfahren angewendet werden.

Die brandschutztechnischen Nachweise mit den auf diese Weise kontrollierten Programmen müssen jedoch wie bei der „Kaltbemessung“ von einem hierfür besonders qualifizierten Prüfingenieur geprüft werden, um der Gefahr von Anwendungsfehlern zu begegnen.

6.7 Industriebau – Nachweis nach DIN 18230 Teil 1

Industriebauten zählen nach den Bauordnungen der Länder zu den baulichen Anlagen und Räumen besonderer Art oder Nutzung. Durch DIN 18230-1 [6.9] in Verbindung mit der Industriebaurichtlinie [6.35] besteht ein einheitliches Verfahren zur brandschutztechnischen Beurteilung von Industriebauten unter Berücksichtigung der spezifischen Belange und Erfordernisse einer industriellen Nutzung. Bei der brandschutztechnischen Beurteilung werden die Randbedingungen wie Gebäudeabmessungen, Brandlasten, Öffnungsflächen, Umfassungsbauteile und Anlagentechnik berücksichtigt.

DIN 18230-1 dient der Ermittlung der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer der Bauteile von Brandbekämpfungsabschnitten im Industriebau. 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 Energiefreisetzung 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 erf t_f der Bauteile berechnet und anschließend den Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102 zugeordnet. Die Norm enthält keine Anforderungen für die brandschutztechnisch wirksame Ausbildung der Gesamtkonstruktion. Hierfür sind in der Regel zusätzliche Maßnahmen erforderlich (z. B. Berücksichtigung der Verformungen und Dehnungen beim Brand, Wahl geeigneter statischer Systeme, Schaffung voneinander statisch unabhängiger Teilbereiche und Sollbruchstellen) [6.36].

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 $t_{\text{ä}}$ nach Gleichung (6.19) ermittelt.

$$t_{\text{ä}} = q_R \cdot c \cdot w \quad (6.19)$$

mit

q_R rechnerische Brandbelastung in kWh/m²

c Umrechnungsfaktor c in min·m²/kWh

w Wärmeabzugsfaktor zur Berücksichtigung der Ventilationsbedingungen

Bei der Ermittlung von $t_{\text{ä}}$ muss berücksichtigt werden, ob es sich um ein- oder mehrgeschossige Brandbekämpfungsabschnitte handelt [6.37]. Das Prinzip zur Ermittlung der äquivalenten Branddauer wird in Bild 6.19 dargestellt. Die äquivalente Branddauer $t_{\text{ä}}$ beschreibt den Zeitpunkt, zu dem bei einem Normenbrand annähernd die gleichen Brandwirkungen wie bei einem natürlichen Brand entstehen. Als Maßstab für die Brandwirkung werden die Bauteiltemperaturen bei einem natürlichen Brand und einem Normbrand verglichen. Die äquivalente Branddauer $t_{\text{ä}}$ ist dann der Zeitpunkt, zu dem die Bauteiltemperatur im Normbrand den maximalen Wert der Bauteiltemperatur bei einem natürlichen Brand erreicht.

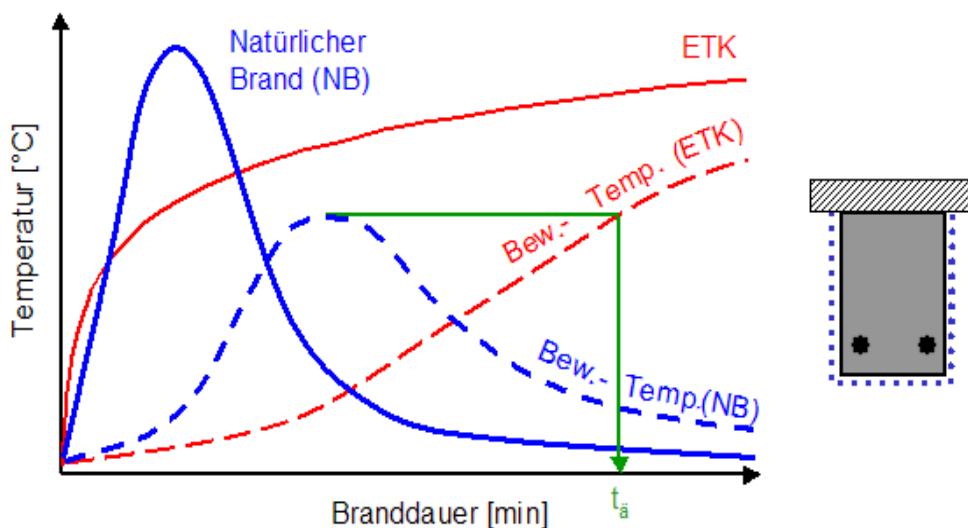


Bild 6.19 Bestimmung der äquivalenten Branddauer $t_{\text{ä}}$

Die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F wird nach Gleichung (6.20) bestimmt.

$$\text{erf } t_F = t_{\text{ä}} \cdot \gamma \cdot \alpha_L \quad (6.20)$$

mit

γ Sicherheitsbeiwert für Bauteile der Brandsicherheitsklasse SK_b 3; bei Bauteilen der Brandsicherheitsklasse SK_b 2 und SK_b 1 ist anstelle von γ der Beiwert δ anzusetzen

α_L Zusatzbeiwert zur Berücksichtigung der brandschutztechnischen Infrastruktur

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

Die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F nach Gleichung (6.17) wird abschließend der Benennung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-4 zugeordnet. Nach der Feuerwiderstandsklasse werden die Brandschutzklassen I bis V und damit die Anforderungen der Industriebaurichtlinie festgelegt.

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, usw. genau beachtet werden.

6.8 Zusammenfassung

In Kapitel 6 werden die brandschutztechnischen Nachweise von Bauteilen und Tragwerken beschrieben. Neben der traditionellen Brandschutzbemessung nach DIN 4102-4 wird vor allem die Brandschutzbemessung nach den Eurocodes mit ihren drei Nachweistufen dargestellt.

Die Eurocodes ermöglichen abweichend von der Einheitstemperaturzeitkurve auch die Bemessung für natürliche Brände.

Für Stahlbeton-, Spannbeton- und Verbundbauteile sind in den Eurocodes Bemessungstabellen angegeben, die vergleichbar mit den Bemessungstabellen der DIN 4102-4 sind.

Für die Untersuchung einzelner Bauteile können die vereinfachten Rechenverfahren verwendet werden. Hierbei handelt es sich um Handrechenverfahren, die z. B. in Form von Tabellenkalkulationen automatisiert werden können. Die Verfahren funktionieren grundsätzlich ähnlich wie die „Kaltbemessung“. Zusätzlich werden vereinfachte Annahmen bezüglich des Steifigkeits- und Festigkeitsabfalls der Baustoffe und ggf. der Ausbildung von Zwangsschnittgrößen angesetzt.

Mit Hilfe der allgemeinen Rechenverfahren kann das Trag- und Verformungsverhalten beliebiger Bauteile und Tragwerke unter Brandbeanspruchung berechnet werden. Hinsichtlich der Bauteilabmessungen, der Baustoffe und der thermischen Beanspruchungen bestehen grundsätzlich keine Einschränkungen, sofern die Rechengrundlagen in Form von temperaturabhängigen Materialgesetzen bekannt sind, die Rechnerkapazität eine ausreichend feine Diskretisierung der Querschnitts- und Systemabmessungen erlaubt und das allgemeine Rechenverfahren die maßgebende Versagensart erfasst. Damit eignen sich die allgemeinen Rechenverfahren besonders für Bauteile und Tragwerke, deren Brandverhalten aufgrund der Abmessungen nicht im Brandversuch untersucht werden können. Dazu zählen insbesondere statisch unbestimmte Konstruktionen, bei denen das Verhalten des Gesamtsystems nicht durch Versuche an Teilsystemen bestimmt werden kann. Für diese Tragwerke stellen die numerische Modellierung und der rechnerische Nachweis die einzige Möglichkeit zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer dar.

Bei Anwendung der allgemeinen Rechenverfahren 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 steigende Bauteiltemperaturen abgesichert. Für die Abkühlphase eines Brandes liegen bisher keine ausreichenden Kenntnisse vor, um die vorhandenen Materialmodelle zu verifizieren.

Zusätzlich müssen die Nachweise der allgemeinen Rechenverfahren von qualifizierten Fachkräften kritisch überprüft werden. Wie bei jedem anderen Programm müssen die Eingabedaten problemspezifisch korrekt und sinnvoll sein, damit das richtige Ergebnis ermittelt werden kann. Randbedingungen wie Auflagerung, Bauteilabmessungen und Rechengrundlagen wie Materialgesetze undoder Brandbeanspruchung müssen, sofern nicht im Programmcode verarbeitet, in korrekter Weise eingegeben werden. Ingenieurmäßige Vereinfachungen beispielsweise bei der Diskretisierung müssen sinnvoll sein, dafür muss der Anwender ausreichende Fachkenntnisse besitzen. Die kritische „Interpretation“ der programmberrechneten Ergebnisse ist umso wichtiger, je komplexer und damit für den Anwender undurchschaubarer der Rechengang wird. Die Konsistenz von Verformungs- und Tragverhalten muss immer gegeben sein. Ein Tragwerk, welches rechnerisch nicht versagt hat, dessen Verformungen durch die thermische Belastung jedoch übermäßig angewachsen sind, wird in der Praxis nicht als brandschutztechnisch ausreichend bemessen eingestuft werden können.

6.9 Literatur

- [6.1] DIN 4102. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.
 - Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe September 1977.
 - Teil 3: Brandwände und nichttragende Außenwände, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe September 1977.
 - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. Ausgabe März 1994.
 - Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten, November 2004
 - Teil 4/A.1: Änderungen A1, November 2004.
- [6.2] DIN EN 1991-2-2. Eurocode 1. Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Ausgabe September 2003.
- [6.3] DIN EN 1992-1-2. Eurocode 1. Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Ausgabe Oktober 2006.
- [6.4] DIN EN 1993-1-2. Eurocode 3. Planung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Ausgabe Oktober 2006.
- [6.5] DIN EN 1994-1-2. Eurocode 4. Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton. Teil 1-2: Allgemeine Regeln Tragwerksbemessung für den Brandfall. Ausgabe November 2006.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

- [6.6] DIN EN 1995-1-2. Eurocode 5. Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Bemessung für den Brandfall. Ausgabe Oktober 2006.
- [6.7] DIN EN 1996-1-2. Eurocode 6. Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Ausgabe Oktober 2006.
- [6.8] DIN EN 1999-1-2 – Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Ausgabe Mai 2007.
- [6.9] DIN 18230 Teil 1. Baulicher Brandschutz im Industriebau. Teil 1 Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Ausgabe Mai 1998.
- [6.10] RICHTER, E.; HOSSER, D.: Brandverhalten von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen nach deutschen und europäischen Normen. Bauingenieur, Band 77, Juli / August 2002.
- [6.11] HARTZ, U.: Erläuterungen zur „DIBt-Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1992-1-2 in Verbindung mit DIN 1045-1“. in: DIBt Mitteilungen, Heft 2, Berlin, 2002.
- [6.12] HERTEL, H.: Erläuterungen zum Grundlagendokument Brandschutz. Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin 25 Heft 2 und 3, 1994.
- [6.13] SOMMER, T.: Perspektiven der Brandschutzbemessung nach DIN 4102 Teil 4, Teil 22 und Eurocode. Braunschweiger Brandschutz-Tage 2007, 26. und 27. September 2007 in Braunschweig, Tagungsband S. 75-88. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 199.
- [6.14] HOSSER, D.; RICHTER, E.: Konstruktiver Brandschutz im Übergang von DIN 4102 zu den Eurocodes. Betonkalender 2009. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2009.
- [6.15] DAfStb-Richtlinie für hochfesten Beton; Ergänzung zu DIN 1045/07.88 für die Festigkeitsklassen B 65 bis B115; Ausgabe August 1995.
- [6.16] Nationaler Anhang zu DIN EN 1991-1-2/NA, Ausgabe April 2009
Nationaler Anhang zu DIN EN 1992-1-2/NA, Ausgabe April 2009
Nationaler Anhang zu DIN EN 1993-1-2/NA, Ausgabe April 2009
Nationaler Anhang zu DIN EN 1994-1-2/NA, Ausgabe April 2009
Nationaler Anhang zu DIN EN 1995-1-2/NA, Ausgabe April 2009
Nationaler Anhang zu DIN EN 1996-1-2/NA, Ausgabe April 2009
Nationaler Anhang zu DIN EN 1999-1-2/NA, Ausgabe April 2009
Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [6.17] HOSSER, D.; DORN, T.; RICHTER, E.: Brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen nach Eurocode 2 - 5. Vergleichsrechnungen zur Untersuchung des Sicherheitsniveaus bei unterschiedlichen Bauarten. Abschlussbericht im Auftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, Az.: RS II - 2 - 674102 - 93.41, Braunschweig, 1995.

- [6.18] DIN V ENV 1992-1-1. Eurocode 2. Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1: Grundlagen für den Hochbau, Juni 1992.
- [6.19] SCHAUMANN, P.: Brandschutznachweise für ungeschützte Stahlkonstruktionen - Näherungsformeln für die Erwärmung nach ETK. Bundesbaublatt, Heft 7, S. 69-71, 1999.
- [6.20] BOTH, C.: The Fire Resistance of Composite Steel-Concrete Slabs. Dissertation TNO Building and Construction Research, Delft, 1998.
- [6.21] 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.
- [6.22] DORN, T.: Brandschutzbemessung im Verbundbau. Beitrag in: Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes, Beuth-Kommentar, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich. 1. Auflage 2000.
- [6.23] HOSSER, D.; DORN, T.; EL-NESR, O.: Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen. Stahlbau 63, Heft 3, 1994.
- [6.24] STEINERT, C.: Bestimmung der Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall. Abschlussbericht im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn, Az.: Ko 204 / 38 - 1, Braunschweig, 1996.
- [6.25] 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.
- [6.26] ZEHFUß, J.; HOSSER, D.: Vereinfachtes Naturbrandmodell für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken, In: Bauphysik 27 (2005) Heft 2. S. 79-86.
- [6.27] 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.
- [6.28] KORDINA, K.; EHM, H.; POSTEL, R.: Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 230, Berlin, 1975.
- [6.29] DIN EN 1990:2002-10. Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Fassung EN 1990:2002.
- [6.30] 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 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

- [6.31] *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.
- [6.32] *SCHNEIDER, U.; DIEDERICHS, U.; WEIß, R.*: Hochtemperaturverhalten von Festbeton. Sonderforschungsbereich 148 – Brandverhalten von Bauteilen. Arbeitsbericht 1975 - 1977. Teil II, Technische Universität Braunschweig, Juli 1977.
- [6.33] *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.
- [6.34] *ZEHFUß, J.; RICHTER, E.*: Bewertungskriterien für rechnerische Brandschutznachweise nach den Eurocodes. Braunschweiger Brandschutztage '99. 8. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig, Heft 145, Braunschweig, 1999.
- [6.35] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau – Fassung März 2000. DIBt Mitteilungen 6 / 2000.
- [6.36] *BECKER, W. ET AL.*: Baulicher Brandschutz im Industriebau. Beuth-Kommentar zu DIN 18230, Hrsg: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB, Bruchsal, Beuth-Verlag Berlin, Wien, Zürich und Bauverlag Wiesbaden, Berlin. 1. Auflage 1996.
- [6.37] *KORDINA, K.; MEYER-OTTENS, C.*: Beton Brandschutz Handbuch. 2. Auflage, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 1999.

7 ANLAGENTECHNISCHER UND ABWEHRENDER BRANDSCHUTZ

7.1 Allgemeines

Anlagentechnische und abwehrende Brandschutzmaßnahmen können maßgeblich die Brandentwicklung und die Brandwirkungen 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 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 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 Feuerwiderrstandsdauer der Bauteile eingeht.

Im Rahmen der in diesem Leitfaden empfohlenen Ingenieurmethoden des Brandschutzes kann einerseits die günstige Wirkung auf das Brandszenario über den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsraten 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 geringen Wahrscheinlichkeit ausfallen kann. Es sind also grundsätzlich verschiedene Brandszenarien – mit auslegungsgemäßer Wirkung der anlagentechnischen und / oder abwehrenden Brandschutzmaßnahmen zu betrachten.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass bei der Anwendung von Ingenieurmethoden im Regelfall die Schwellbrandphase nicht berücksichtigt wird, sondern ein offenes Feuer angenommen wird. Gerade die Schwellbrandphase wird von der zur Verfügung stehenden Meldersensorik besonders zuverlässig erfasst.

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 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, da hiervon die Höhe der maximal auftretenden Wärmefreisetzungsratenrate abhängt (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 häufig als Schwellbrände, d. h. niedrigenergetische Oxidationsprozesse mit sehr geringer Wärme- und meist sehr intensiver Rauchentwicklung. Die Zeitabstände von Beginn eines Schwellbrandes zum Entstehen eines offenen Brandes sind sehr verschieden und können sich im Minutenbereich bis zu mehreren Stunden hinziehen. Aufgrund der starken Rauchentwicklung während der Schwellbrandphase kann sich der Einsatz von Brandmeldeanlagen mit automatischen Rauchmeldern bei zu erwartenden Schwellbränden besonders günstig auswirken.

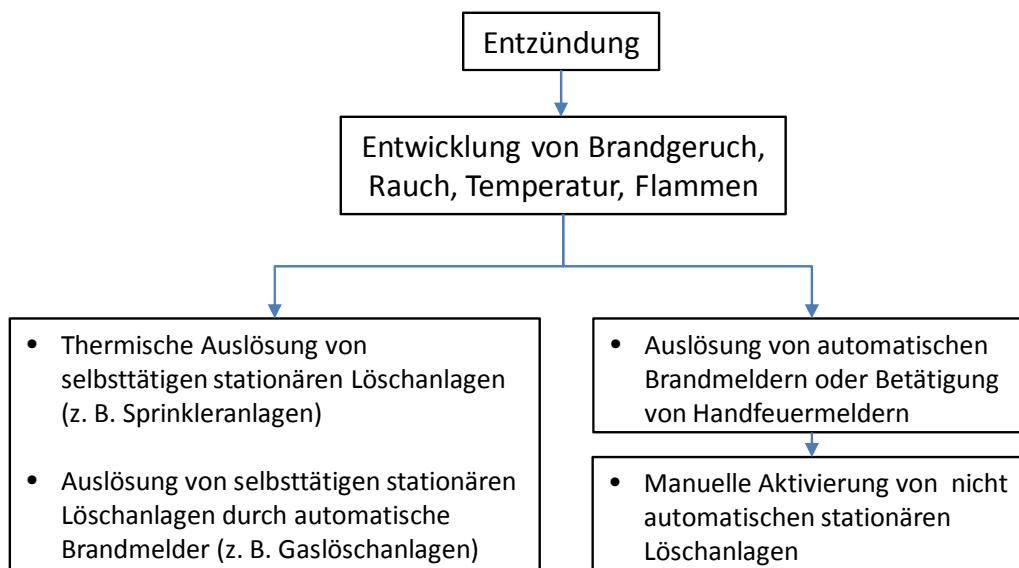


Bild 7.1 Ablaufdiagramm für die Brandbekämpfung durch Löschanlagen

Automatische Brandmeldeanlagen verkürzen die Alarmierungszeit, so dass die Brandbekämpfung der Feuerwehr dadurch zu einem früheren Zeitpunkt beginnen kann. Sie beeinflussen damit in erster Linie den für die Bemessung anzunehmenden Gesamtenergiegehalt der Wärmefreisetzungsratenkurve.

Da die Wärmefreisetzungsratenrate nicht nur die Temperaturentwicklung sondern auch die Rauchentwicklung beeinflusst, können automatische Brandmeldeanlagen in Verbindung mit der frühzeitigen Einleitung wirksamer Brandbekämpfung auch zur Reduzierung der insgesamt freigesetzten Rauchmengen beitragen.

Wirksame Löschanlagen reduzieren das Maximum der Wärmefreisetzungsraten und begrenzen das Ausmaß des Brandes, so dass wirksame Löschmaßnahmen möglich sein sollten.

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen können die thermische Beanspruchung auf das Tragwerk verringern, dabei aber in Verbindung mit den vorhandenen Zuluftnachströmöffnungen die Sauerstoffversorgung und damit die maximale Wärmefreisetzungsraten eines ventilationsgesteuerten Brandes erhöhen. Rauchabzugsanlagen können die Dicke einer Rauchschicht verringern und damit die negativen Einflüsse von Sichttrübungen und toxischen Gaskonzentrationen auf die Personenevakuierung mindern.

7.2 Brandmeldeanlagen

7.2.1 Arten von automatischen Brandmeldeanlagen

Die Aufgabe einer automatischen Brandmeldeanlage (BMA) mit angeschlossener akustischer Alarmierungsanlage besteht darin, einen Brand im Frühstadium 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).

Die Planung und Projektierung von Brandmeldeanlagen muss nach den gültigen technischen Regelwerken erfolgen, insbesondere sind die DIN VDE 0833 Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall Teil 1 und 2 und die DIN 14675 zu beachten. Die BMA ist in der Regel Bestandteil des Brandschutzkonzeptes, so dass sie sich in ihrer Funktionsweise auch an den darin beschriebenen Parametern orientiert. Unterschieden werden Brandmeldeanlagen hinsichtlich ihres Schutzmanges in Vollschutz, Teilschutz, Schutz von Rettungswegen und Objektschutz. Eine BMA besteht in der Regel aus einem Brandmeldesystem, automatischen Brandmeldern, Handfeuermeldern, Übertragungseinrichtungen, Alarmierungseinrichtungen, Brandfallsteuerungen usw.

Um Brände bereits in ihrem Frühstadium detektieren zu können, ist die Auswahl geeigneter Brandmelder unerlässlich. Brandkenngrößen für unterschiedliche Brandmeldertypen sind Rauch, Wärme, Flammen usw.. Folgende Typen finden Verwendung:

- **Wärmemelder**
Wärmemelder werten den Temperaturanstieg und die Maximaltemperatur über einen Algorithmus zur Alarmgabe aus.
- **Rauchmelder**
Bei Rauchmeldern unterscheidet man zwischen punktförmigen, linienförmigen und Ansaugrauchmeldern. Die punktförmigen Rauchmelder arbeiten nach dem Streulicht-, dem Ionisations- oder dem Durchlichtprinzip. Linienförmige Rauchmelder detektieren Rauch über eine offene Lichtstrecke bei der die Absorption des Lichtes durch Rauchaerosole ausgewertet wird. Ansaugrauchmelder sind aktive Rauchmelder bei denen durch Erzeugung eines Unterdruckes in einem Rohrsystem Umgebungsluft angesaugt und einer Auswerteeinheit zur Auswertung des Rauchanteils zugeführt wird.

- Flammenmelder
Flammenmelder reagieren auf die ultraviolette und/oder infrarote Strahlung einer Flamme.
- Mehrfachsensormelder
Vermehrt 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-/Mehrkkriterienmelder in der Lage, solche Täuschungsgrößen von realen Feuern zu unterscheiden.
- Handfeuermelder
Bei den Handfeuermeldern (Druckknopfmelder) 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 Interventionskräfte.

7.2.2 Wirkung von Brandmeldeanlagen auf das Brandszenario

Brandmeldeanlagen mit angeschlossenen akustischen Alarmierungseinrichtungen oder Sprachalarmanlagen (gem. DIN VDE 0833-4) wirken sich im Rahmen der Beurteilung der Auswirkungen von Brandszenarien zweifach aus:

- Durch die technische Branddetektion durch eine BMA und Ansteuerung der akustischen Alarmierungsanlage werden die sich im Gebäude befindlichen Personen alarmiert. Damit ist der Einsatz der Werk- oder öffentlichen Feuerwehr auf die Rettung von Personen beschränkt, denen eine Selbstrettung nicht möglich ist, wenn der betriebliche Brandschutz funktioniert.
- Die Brandentwicklungsduer, 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.

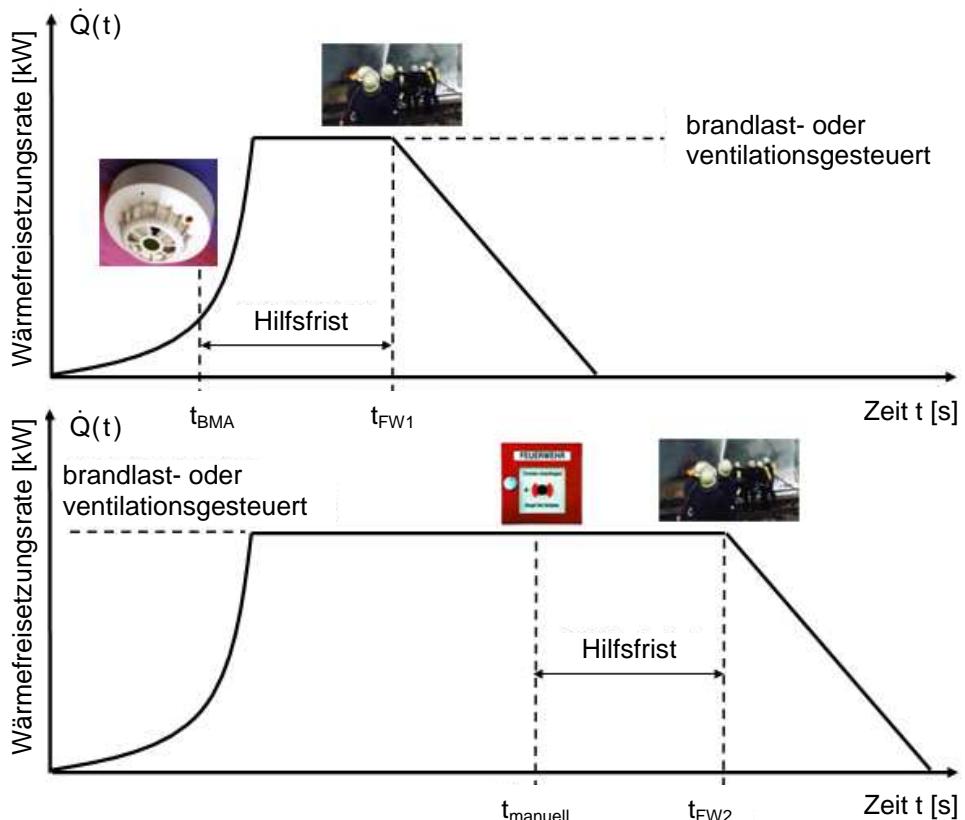
Die Brandentwicklungsduer wird neben der Hilfsfrist der Feuerwehr auch von der Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Alarmierung bestimmt. Diese Zeitspanne wird u. a. von den folgenden Parametern beeinflusst:

- **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:** 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.
- **Kenngröße der Melder:** Rauchmelder lösen bei vielen Brandszenarien/Brandlasten schneller aus als z. B. Wärmemelder.
- **Art der Maßnahme gegen Falschalarme gemäß DIN VDE 0833:** Personelle Maßnahmen gegen Falschalarme können zu einem längeren Zeitverzug bis zur Ansteuerung der Übertragungseinrichtung führen als technische Maßnahmen wie z. B. die 2-Meldungsabhängigkeit.

Im Einzelfall ist die Zeitspanne bis zur Detektion in Abhängigkeit der genannten Parameter konservativ abzuschätzen. CFD-Modelle können 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 ingenieurmäßigen Nachweisen angenommene Brandszenario, indem der Gesamtenergiegehalt der Wärmefreisetzungskurve abgemindert wird (Bild 7.2).



- t_{FW1} Zeitspanne bis zum Start der Brandbekämpfung **mit** automatischen Meldern
 t_{FW2} Zeitspanne bis zum Start der Brandbekämpfung **ohne** automatische Melder

Bild 7.2 Einfluss von automatischen Brandmeldeanlagen auf den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates

Sind automatische Melder vorhanden, kann in der Regel eine Brandentdeckung in der Brandentstehungsphase angenommen werden. Die Zeitspanne bis zum Beginn von Löschaßnahmen verkürzt sich, so dass die Abklingphase eher einsetzt. Eine Quantifizierung der Wirkung von automatischen Meldern ist jedoch ausschließlich in Verbindung mit Werkfeuerwehren möglich, weil die Hilfsfrist von öffentlichen Feuerwehren mit größeren Unsicherheiten verbunden ist und nur grob abgeschätzt werden kann.

Im Rahmen von Evakuierungsnachweisen 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 Räumungszeit aus (siehe Abschnitt 9.3).

7.2.3 Zuverlässigkeit von Brandmeldeanlagen

Die Betriebssicherheit von Brandmeldeanlagen (BMA) ist auf Grund der Produktnormung sehr hoch. Die Bestandteile von BMA entsprechen der auf Zuverlässigkeit ziellenden Normung: DIN EN 54 Teil 1 bis 25; DIN VDE 0833 Teil 1, 2, und 4 sowie der DIN 14675 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)
- 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 einen Zuverlässigkeitsgrad von 99,91%. Die Stördauerrate 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 Umgebungs-einflüssen (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.

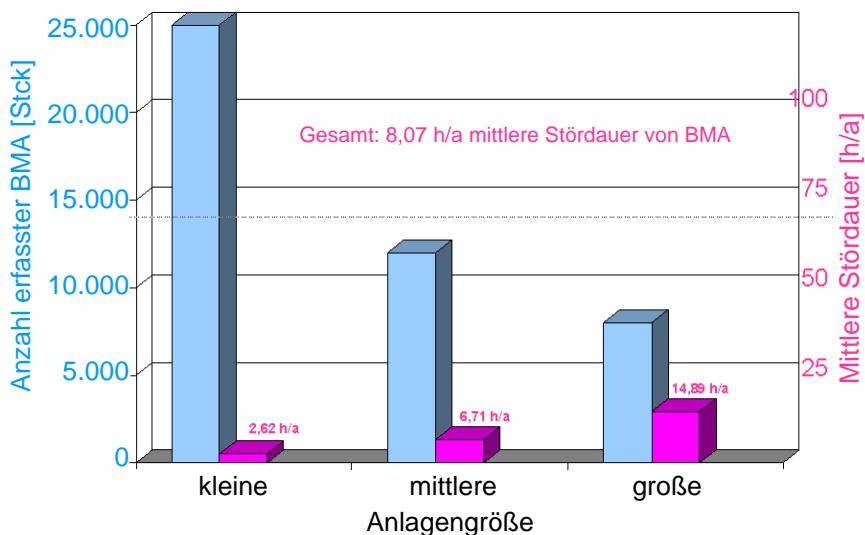


Bild 7.3: Umfrageergebnis zur Verfügbarkeit von BMA [7.11] [7.18]

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.

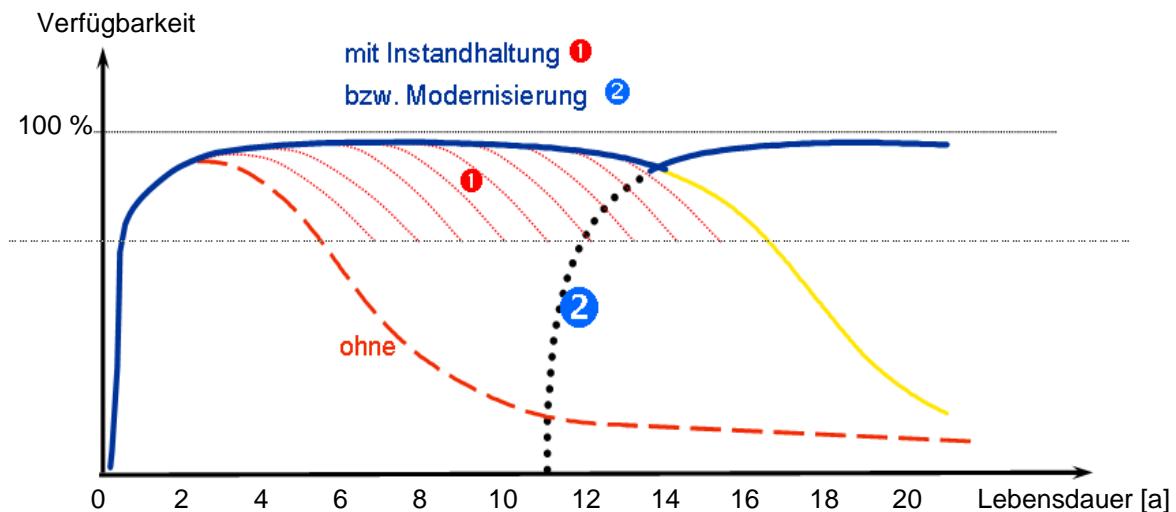


Bild 7.4: Zeitgerechte Instandhaltung und Modernisierung sind wesentlich verantwortlich für die Verfügbarkeit einer Brandmeldeanlage [7.11], [7.18]

7.2.4 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Brandmeldeanlagen

Wie in Abschnitt 7.1 angedeutet, lässt sich die Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Brandmeldeanlagen mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeitberechnung genauer untersuchen [7.5] (vgl. Kapitel 10).

Im Folgenden werden die in den bauaufsichtlichen Verordnungen und Richtlinien mit Stand 2008 verankerten Regelungen zusammengefasst. 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.

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.

7.3 Löschanlagen

7.3.1 Arten von Löschanlagen

Die Aufgabe von Löschanlagen besteht einerseits darin, das Ausmaß des Feuers bis zum Eintreffen der Feuerwehr wirksam zu begrenzen, damit eine wirksame 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.

Folgende Löschanlagen werden in der Praxis, in Industrie- und Gewerbe und in anderen Sonderbauten eingesetzt:

- Wasserlöschanlagen
 - Sprinkleranlagen,
 - Sprühwasserlöschanlagen,
 - Feinsprüh-Löschanlagen,
- Schaumlöschanlagen,
- Gaslöschanlagen
 - CO₂, -Löschanlagen,

- Inertgas-/Inertgasgemisch-Löschanlagen,
- Löschanlagen mit halogenierten Kohlenwasserstoffen,
- Pulverlöschanlagen.

Sprinkleranlagen sind in der Praxis am häufigsten anzutreffen, was einerseits mit ihrer Effizienz und andererseits mit der nachgewiesenen Zuverlässigkeit zu erklären ist. Man unterscheidet folgende Typen von Sprinkleranlagen:

- Nassanlage,
- Trockenanlage,
- Nass-Trockenanlage,
- Vorgesteuerte Anlage,
- Tandemanlage.

Tabelle 7.1 Sprinklertypen (Anmerkung: LH = light hazard (Nutzungen mit kleiner Brandgefahr); OH1 = ordinary hazard, group 1 (Nutzungen mit mittlerer Brandgefahr Gruppe 1 nach VdS CEA 4001)

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 paraboloid-förmig	gilt nicht für Regalschutz	Hohlraumschutz Rasterdecken
Seitenwandsprinkler	stehend	einseitig paraboloidförmig		geringe Raumhöhe LH / OH 1
Horizontale Seitenwandsprinkler	horizontal	vergrößerte Wurfweite	12 - 21 m ²	LH / OH 1
ESFR-Sprinkler	hängend und stehend		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 und Wasserbeaufschlagung,
4. Auswahl von geeigneten Sprinklerköpfen (siehe Tabelle 7.1),
5. Dimensionierung der Wasserversorgung,
6. Bemessung der Energieversorgung.

7.3.2 Wirkung von Löschanlagen auf das Brandszenario

Da belastbare statistische Daten zur Wirksamkeit und Zuverlässigkeit manuell ausgelöster Löschanlagen derzeit nicht verfügbar sind, konzentrieren sich die nachfolgenden Ausführungen auf selbsttätige Feuerlöschanlagen und insbesondere auf Sprinkleranlagen, zu denen die umfangreichsten Erfahrungswerte vorliegen.

Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsraten bei Bränden, die durch die Wirkung einer selbsttätigen Löschanlage beeinflusst werden, hängt in erster Linie von folgenden Parametern ab:

- Brandverlauf in der Anfangsphase (Brandentwicklungszeit t_g),
- Ansprechempfindlichkeit der automatischen Löschanlage (Response-Time-Index RTI) bzw. der BMA zur Ansteuerung der Löschanlage,
- Raumhöhe, Raumumfassung bei Gaslöschanlagen,
- Dimensionierung der Löschanlage (Abstand der Löschdüsen, Menge des freigesetzten Löschmittels),
- Brandverlauf nach Auslösung der Löschanlage,
- anfängliche Temperatur im Brandraum,
- Auslösetemperatur der Löschanlage,
- maximaler Abstand der Löschelement-Achse von der Plume-Achse.

Grundsätzlich wird angenommen, dass die Anlagen – sofern sie nach anerkannten Regeln der Technik bemessen, installiert und betrieben sind – in der Brandentwicklungsphase auslöst, bevor das Maximum der Wärmefreisetzungsraten 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 der Sprinkler aus (Tabelle 7.2).

Tabelle 7.2 Ansprechempfindlichkeit von Sprinklern

Ansprechempfindlichkeitsklasse	Response-Time-Index [(ms) ^{0,5}]
standard	> 80 ≤ 200
spezial	50 bis 80
schnell	< 50

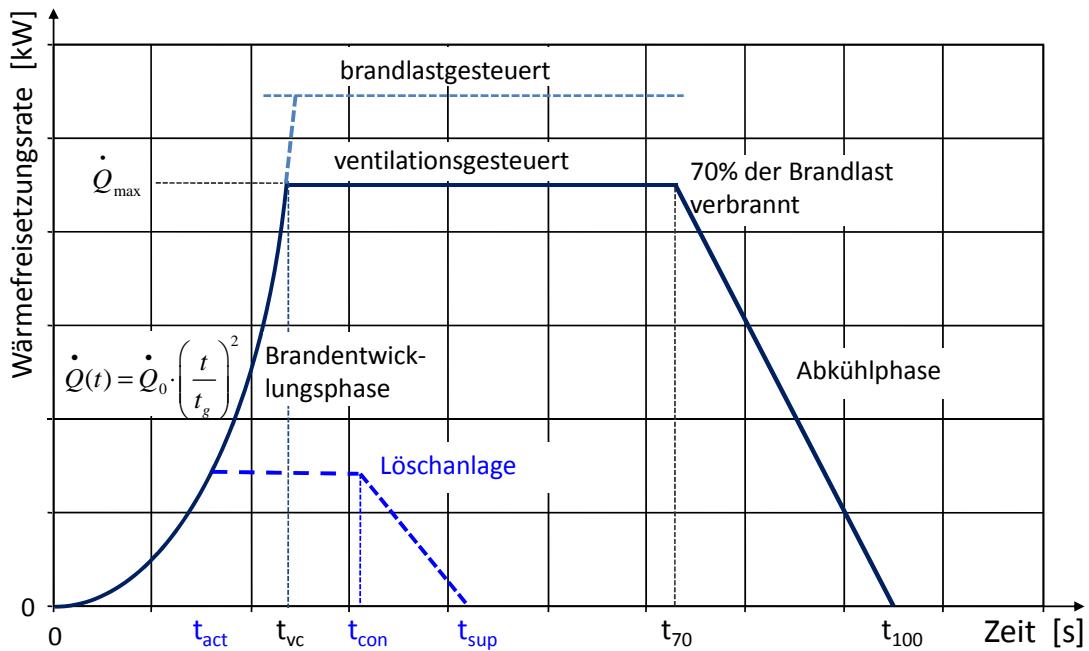


Bild 7.5 Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsraten bei Begrenzung durch Brandlast, Ventilation oder Löschanlagen. Der Zeitpunkt t_{70} markiert den Zeitpunkt, an dem 70 % der Brandlasten verbraucht sind.

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 als eine ungünstigere Variante einzustufen ist als der Löscherfolg bei dem gleichen Brand zwischen zwei Sprinklern, wenn *beide* Sprinkler auslösen.

Gemäß [7.13] kann vereinfacht angenommen werden, dass die Wärmefreisetzungsraten 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 Beschreibung des abklingenden Astes der Wärmefreisetzungsraten stellt eine rechentechnische Vereinfachung dar. In der Realität ergibt sich analog zur Brandwachstumsphase ein konkaver Kurvenverlauf (vgl. Bild 4.1 in Kapitel 4).

Die Zeitdauer bis zur Brändeindämmung wird für jede Wärmefreisetzungsraten \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 vieler Sprinkler nicht zu stark absinkt (Auslegung der Anlage).

Der Verlauf der Wärmefreisetzungsraten ergibt sich folgendermaßen (siehe [7.4]):

$$0 - t_{act}: \quad \dot{Q}(t) = \left(\frac{t}{t_g} \right)^2 \quad [\text{MW}] \quad (7.1)$$

$$t_{act} - t_{con}: \quad \dot{Q}(t) = \dot{Q}_{LK} \quad [MW] \quad (7.2)$$

$$t_{con} - t_{sup}: \quad \dot{Q}(t) = \frac{\dot{Q}_{LK}}{t_{sup} - t_{con}} \cdot (t_{sup} - t) \quad [MW] \quad (7.3)$$

mit

t_{act} Sprinklerauslösezeit [s]

t_{con} Zeitpunkt des Beginns der Brandkontrolle durch die Feuerwehr [s]

t_{sup} Zeitpunkt der Brändeindämmung [s]

\dot{Q}_{LK} Maximum der Wärmefreisetzungsraten im löschanlagenkontrollierten Fall [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 Sprinkler von der Plume-Achse von 2,8 m und einem RTI-Wert von $80 (\text{ms})^{0,5}$.

7.3.3 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 7.3 zusammengestellt.

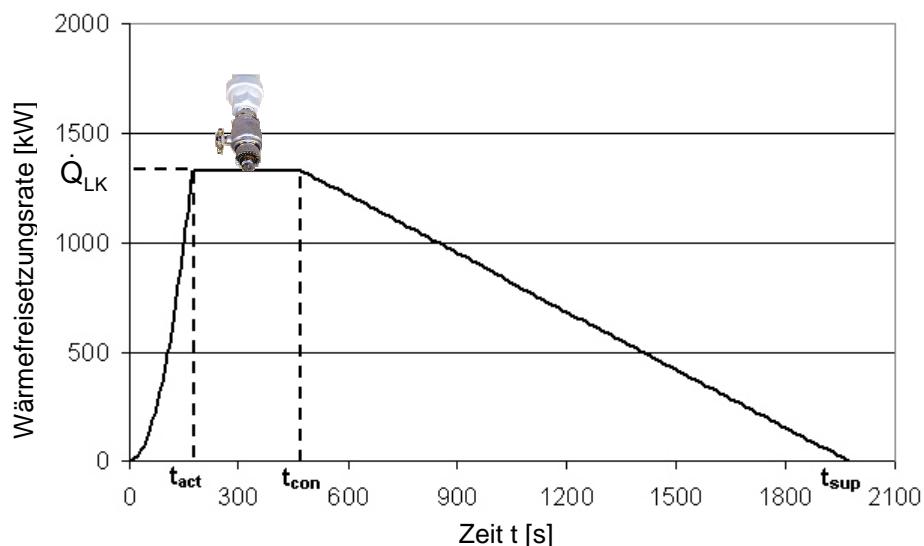


Bild 7.6 Beispiel für Brandverlauf in Form des Verlaufes der Wärmefreisetzungsrate bei Einsatz einer Sprinkleranlage (alle Modellgrößen mit ihren Nennwerten eingesetzt)

Tabelle 7.3 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

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.

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 Nachfüleinrichtungen 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,
 - 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 Auftrag 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 7.7).

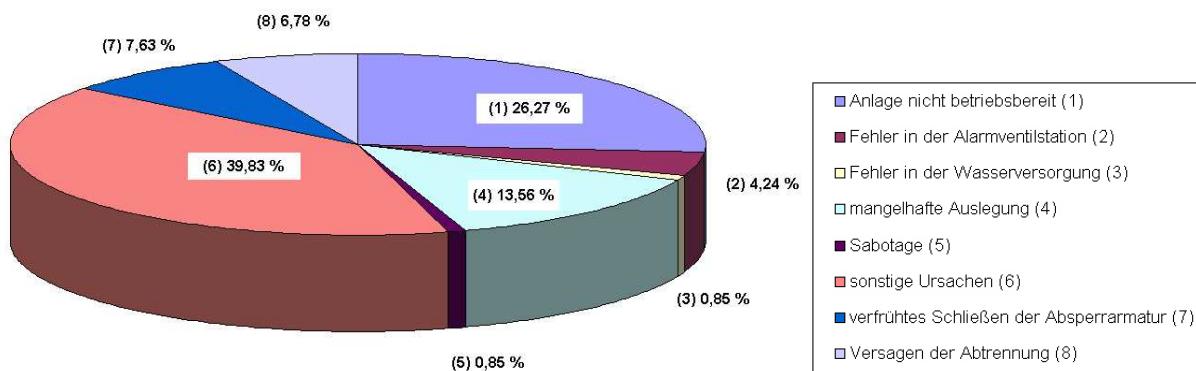


Bild 7.7 Prozentualer Anteil der Ursachen für das Versagen von Sprinkleranlagen

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:

$$p_f, \text{Sprinkler} = 0,02.$$

7.3.4 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Löschanlagen

Wie in Abschnitt 7.1 angedeutet, lässt sich die Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Brandmeldeanlagen mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeit berechnung unter Berücksichtigung der individuellen Randbedingungen genauer untersuchen [7.5] (vgl. Kapitel 10).

Alternativ kann das semi-probabilistische Verfahren nach Kapitel 10 angewendet werden. Dabei wird das Naturbrandszenario betrachtet, das sich bei Ausfall der anlagentechnischen Maßnahmen ergeben würde. Der Sicherheitsgewinn durch die 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 2008 verankerte Regelungen zur Herabsetzung bestimmter Anforderung bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage angeführt.

- Ohne Sprinklerschutz müssen tragende Wände, Pfeiler und Stützen bei ergeschossigen 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 m^2 , beim Vorhandensein einer Sprinkleranlage darf die Rauchabschnittsgröße dagegen maximal 5.000 m^2 betragen.

7.4 Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

7.4.1 Allgemeines

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen erfüllen bei richtiger Dimensionierung im Brandfall die folgenden Aufgaben:

- Erleichterung einer wirkungsvollen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr, indem die Sichtung des Brandherdes verbessert wird,
- Unterstützung bei der Rettung von Personen durch Verringerung von Rauch- und Brandgasen,
- Verhinderung bzw. Verzögerung des Feuerübersprungs (flash-over),
- Verringerung von Brandfolgeschäden durch Rauch- und Brandgase (Schutz von rauchempfindlichen Sachwerten),
- Verminderung der thermischen Beanspruchung von Bauteilen durch Abfuhr der Brandwärme.

Die erforderliche Öffnungsfläche von natürlichen Rauchabzugsanlagen hängt von folgenden Randbedingungen ab:

- Nutzung des Gebäudes (erforderliche Höhe der raucharmen Schicht),
- Brandlasten,
- erwartete Brandentwicklungsduer,
- Raumhöhe,
- Größe und Höhe der Zuluftfläche,
- Höhe der Rauchschürzen,
- Anlagentechnische Ausstattung des Gebäudes (BMA, Löschanlagen),
- Fläche des Rauchabschnitts.

7.4.2 Wirkung von Rauch- und Wärmeabzügen

Die Berücksichtigung der Wirkung von RWA auf das Brandszenario erfolgt auf zweierlei Weise. Zum einen ergibt sich durch die Änderung der Ventilationsverhältnisse ein Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsraten nach Gl. (4.2) in Kapitel 4.4, sofern der Brand ventilationsgesteuert verläuft (Bild 7.8). Außerdem wird der verbesserte Wärmeabzug bei der Berechnung der mittleren Heißgastemperatur im brandlastgesteuerten Fall berücksichtigt (Bild 7.9).

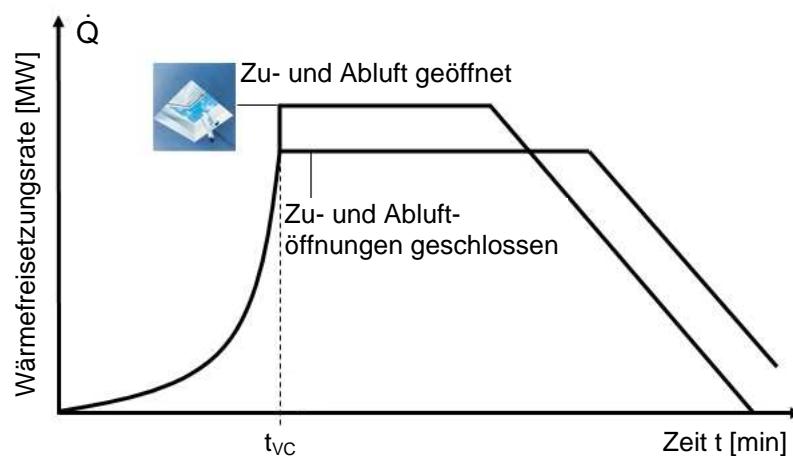


Bild 7.8 Einfluss von Rauch- und Wärmeabzügen auf die Wärmefreisetzungsrates bei einem ventilationsgesteuerten Brand

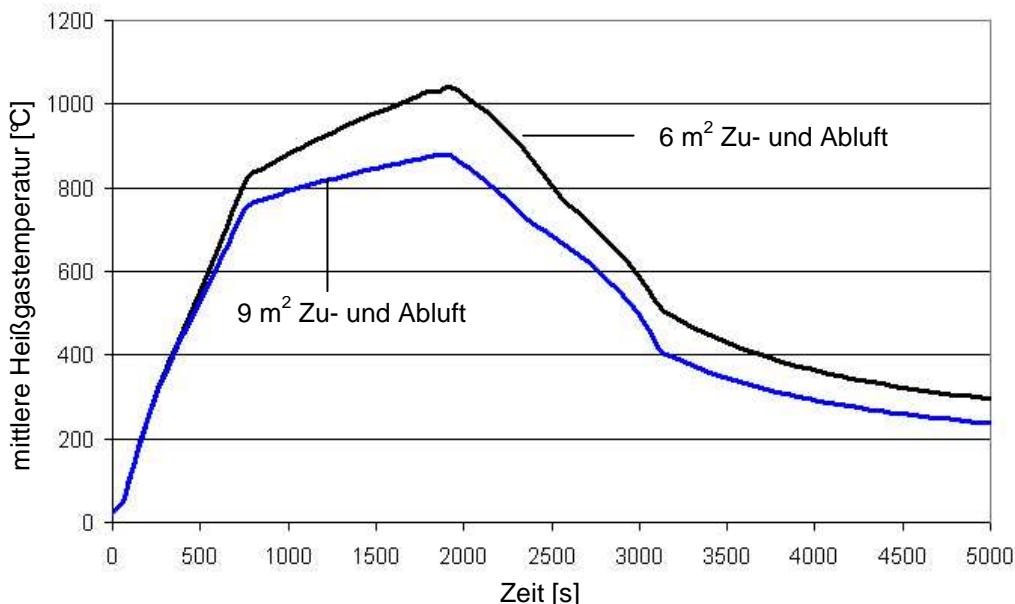


Bild 7.9 Einfluss des verbesserten Wärmeabzuges durch größere Ventilationsöffnungen auf die mittlere Heißgastemperatur bei einem brandlastgesteuerten Brand

7.4.3 Zuverlässigkeit von RWA

Zur Zuverlässigkeit von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen gibt es keine belastbaren statistischen Daten, weil die Funktionsfähigkeit im Anforderungsfall weder Gegenstand der Einsatzstatistiken der Feuerwehren ist noch bei den Erhebungen der Sachversicherer ermittelt wird.

Für den Fall, dass RWA-Anlagen bei Branderkennung manuell durch Betriebspersonal geöffnet werden, gibt [7.7] aufgrund von Expertenbefragung einige grobe Anhaltswerte. Diese sind jedoch auf moderne RWA-Anlagen, die stets auch eine automatische Auslösung vorsehen, nicht übertragbar.

7.4.4 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch RWA

Die Möglichkeit der Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Rauch- und Wärmeabzugsanlagen lässt sich mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigungsberechnung 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 2008 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 der in 2008 gültigen 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.

7.5 Abwehrender Brandschutz

7.5.1 Wirkung von abwehrenden Maßnahmen auf das Brandszenario

Maßgebend für den Einfluss einer Feuerwehr auf den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsraten ist der Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten bzw. die Zeitspanne bis zur Brandkontrolle. Expertenaussagen zufolge kann für anerkannte Werkfeuerwehren eine Hilfsfrist von 5 Minuten angenommen werden, wenn eine automatische Brandmeldung vorhanden ist und genauere Informationen über den Brandort vorliegen.

Im Einzelfall muss objektspezifisch überprüft werden, mit welchen Alarmierungszeiten und Hilfsfristen zu rechnen ist, da diese Zeiten von mehreren Einflussfaktoren beeinflusst werden:

- Art des Brandszenarios,
- Anwesenheit von Betriebspersonal,

- automatische Brandmeldung ja/nein,
- Lage des Objekts (innerstädtisch oder außerbezirklich) in Bezug auf die Verkehrs-dichte,
- Anzahl der ständig verfügbaren Einsatzkräfte
- Anzahl der atemschutzauglichen Einsatzkräfte im Ersteinsatz
- Zufahrtsmöglichkeiten auf das Grundstück,
- Ausrüstung der Feuerwehr
- Vorhandensein und Qualität von Feuerwehrplänen zur Orientierung der Einsatz-kräfte,
- Zugänglichkeit des Objekts (gewaltfreier oder gewaltsamer Zugang, ggf. ständig besetzte Stelle, die Zugang herstellt),
- Löschwasserversorgung im Abstand vom Objekt
- Vorhandensein von trockenen oder nassen Steigleitungen bei mehrgeschossigen Gebäuden,
- Zurückzulegende Entfernung innerhalb des Gebäudes bis zum Brandraum.

Der von den Einsatzkräften zurückzulegende Weg innerhalb des Gebäudes ist von besonde-rer Bedeutung. Hier besteht ein wesentlicher Unterschied, ob es sich um ein erdgeschossi-ges Gebäude mit wenigen Nutzungseinheiten oder um einen aus mehreren Brandabschnit-ten bestehenden Hochhauskomplex handelt.

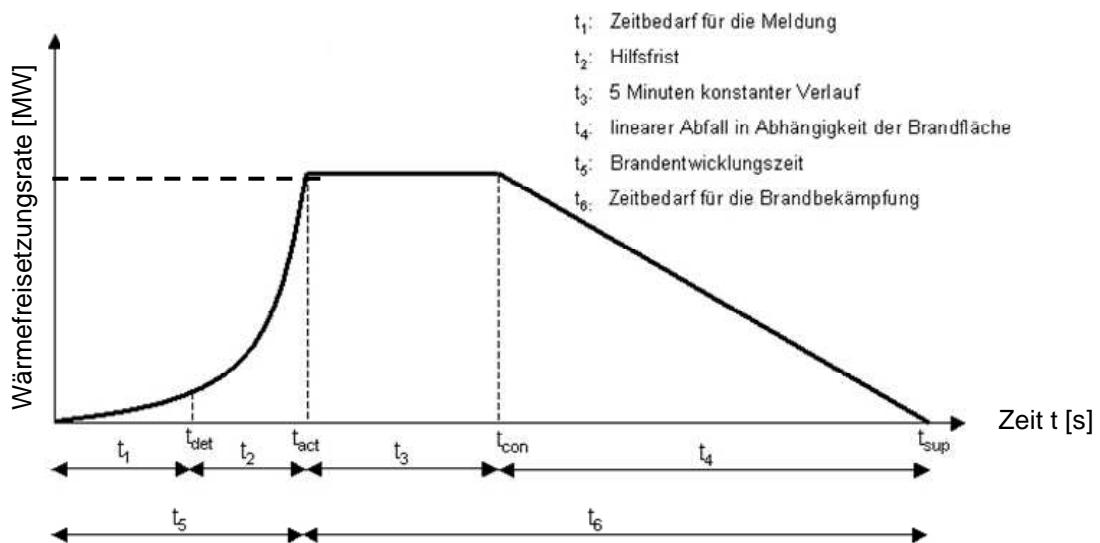


Bild 7.10 Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsraten (qualitativ) bei Einsatz einer Feuer-wehr

Entscheidend für die Beantwortung der Frage, ob bei einer bestimmten Größenordnung ei-nes Brandes überhaupt noch ein Einfluss der Feuerwehr auf die Wärmefreisetzungsraten an-

genommen werden kann, ist die Brandfläche zum Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten in Abhängigkeit der Brandentwicklung. Nach Feuerwehrerfahrung gibt es Grenzwerte für Brandflächen, die von Einzelpersonen und Feuerwehren noch gelöscht werden können.

Es wird konservativ angenommen, dass die Wärmefreisetzungsraten nach Beginn der Löscharbeiten noch für eine Dauer von 5 Minuten konstant verläuft und anschließend linear abklingt. In Bild 7.10 ist der qualitative Verlauf der Wärmefreisetzungsraten dargestellt. Bezuglich des Maximums der Wärmefreisetzungsraten 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 Wärmefreisetzungsraten 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 Wärmefreisetzungsraten ergibt sich wie folgt:

$$0 - t_{act}: \quad \dot{Q}(t) = \left(\frac{t}{t_g} \right)^2 \quad [\text{MW}] \quad (7.7)$$

$$t_{act} - t_{con}: \quad \dot{Q}(t) = \dot{Q}_{max} \quad [\text{MW}] \quad (7.8)$$

$$t_{con} - t_{sup}: \quad \dot{Q}(t) = \frac{\dot{Q}_{max}}{t_{sup} - t_{con}} \cdot (t_{sup} - t) \quad [\text{MW}] \quad (7.9)$$

Bei öffentlichen Feuerwehren ist der Zeitpunkt der Einflussnahme auf den Brandverlauf weitaus schwieriger zu quantifizieren als bei anerkannten Werkfeuerwehren, da die Hilfsfristen infolge der sehr unterschiedlichen Entfernung zwischen Feuerwache und Einsatzort eine größere Bandbreite aufweisen. Bild 7.11 zeigt den Einsatz der öffentlichen Feuerwehr von der Entzündung bis zum Ablöschen des Brandes in Form eines Ablaufdiagramms.

Eine Quantifizierung der Wirkung von öffentlichen Feuerwehren auf das Brandszenario im Rahmen von ingenieurmäßigen Nachweisen kommt derzeit in Ermangelung einer einheitlichen und umfassenden Feuerwehreinsatzstatistik mit statistisch abgesicherten Hilfsfristen in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Feuerwache und Brandort nicht bzw. nur nach Absprache mit der örtlichen Feuerwehr und Bauaufsichtsbehörde in Betracht.

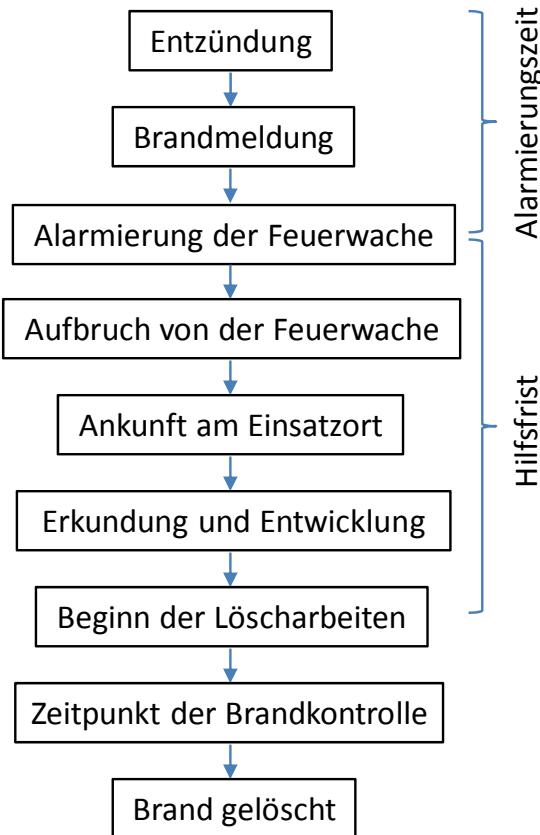


Bild 7.11 Ablaufdiagramm eines Einsatzes der Feuerwehr

7.5.2 Alarmierungszeit

Um die Wirkung der Löschaßnahmen durch eine Werkfeuerwehr auf das Brandszenario quantifizieren zu können, muss unter anderem der Zeitpunkt des Beginns der Brandbekämpfung ab Brandausbruch bekannt sein.

Die Zeitdauer von der Entzündung bis zum Beginn der Löscharbeiten wird als *Brandentwicklungsduer* bezeichnet. Sie setzt sich zusammen aus dem Zeitraum des Brandausbruches bis zur *Alarmierung der Einsatzkräfte* und der *Hilfsfrist*. Im ersten Zeitraum ist vor allem die Brandentdeckungszeit eine im Bezug auf die Rechnung unbestimmte Zeitgröße, die aber bedeutend für den Brandverlauf und das Ausmaß des Feuers ist.

Die Alarmierungszeit bezeichnet die Zeitspanne zwischen der Entzündung und der Benachrichtigung der Feuerwehr. Sie hängt in starkem Maße von den im Einzelfall vorhandenen Bedingungen bezüglich der Brandmeldung ab. Einen günstigen Einfluss haben hier automatische Brandmeldeanlagen mit direkter Aufschaltung zur Feuerwehr.

7.5.3 Hilfsfrist

Die Hilfsfrist bezeichnet die Zeitspanne zwischen der Alarmierung der Feuerwehr und dem Beginn der Löscharbeiten. Sie hängt in erster Linie ab von:

- 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 stehende Einsatzkräfte, insbesondere der atemschutzauglichen Einsatzkräfte,
- dem Ausbildungsstand der Feuerwehrleute,
- der Zugänglichkeit des Objektes.

Der Ausbildungsstand der Feuerwehrleute kann vereinfacht als bundesweit einheitlich angenommen werden. 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 Feuerwache und Brandort, der von den beiden ersten genannten Punkten abhängt, der Wegstrecke und der Verkehrsdichte.

Durch eine statistische Auswertung von Feuerwehreinsatzdatenblätter wurden p-Quantile (p %-Fraktilen) der Zeitspanne zwischen Alarmierung und Beginn der Löschmaßnahmen in Abhängigkeit von der effektiven Entfernung zwischen Feuerwache und Brandort ermittelt, um somit die Hilfsfrist quantifizieren zu können [7.4]. Die Ergebnisse können in Bild 7.12 abgesehen werden.

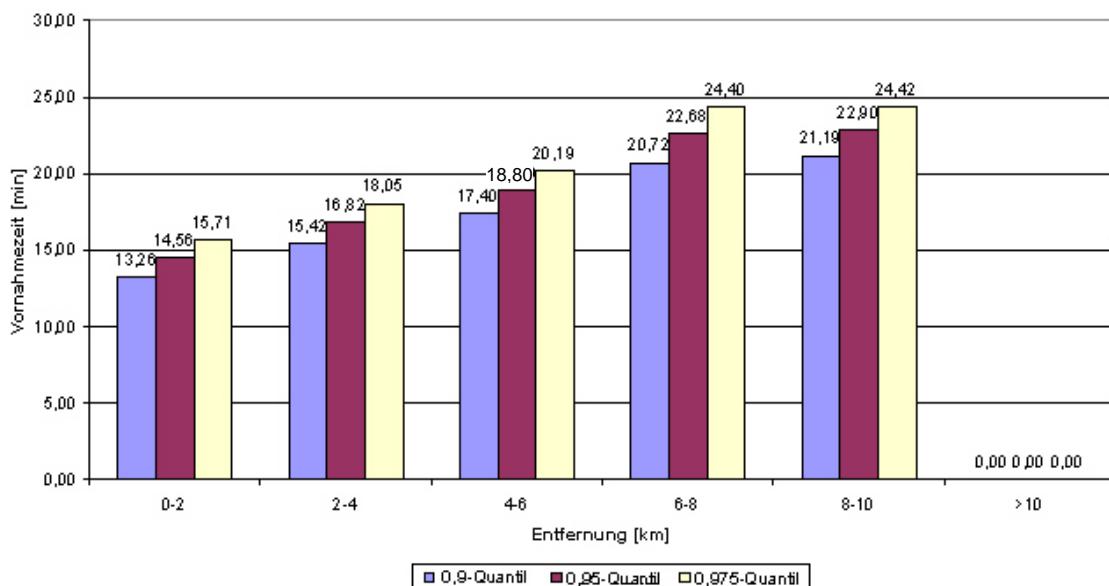


Bild 7.12 Quantile der Hilfsfristen (Vornahmezeit) in Abhängigkeit der Entfernung von der Feuerwache zum Brandort

Je nachdem, welche Randbedingungen bezüglich der Brandmeldung vorliegen, kann die Brandentwicklungsduer ermittelt werden, indem die Alarmierungszeit mit dem p-Quantil der Hilfsfrist addiert wird. Eine allgemeingültige Verwendung der p-Quantile im Sicherheitskonzept setzt allerdings eine umfassende Brandstatistik voraus.

Ist die Brandausbreitungsgeschwindigkeit näherungsweise bekannt, kann die zum Zeitpunkt des Eingriffs der Feuerwehr vorhandene Brandfläche mit Hilfe der Angaben zu Alarmierungszeiten und Hilfsfristen abgeschätzt werden.

7.5.4 Modell zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit 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 einer maximal beherrschbaren Brandfläche $A_{f,grenz}$ verglichen wird (Gleichung 7.10).

$$Z = A_{f,grenz} - A_f = A_{f,grenz} - \pi \cdot (v_{aus} \cdot t_{LA})^2 \quad (7.10)$$

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 Brandentwicklungs geschwindigkeit v_{aus} zugeordnet wird. In den Beispielrechnungen wurde die Brandentwicklungs geschwindigkeit (v_{aus}) stellvertretend für eine mittlere Brandausbreitung zu $v_{aus} = 0,4 \text{ m/min}$ und für eine schnelle Brandausbreitung zu $v_{aus} = 1,0 \text{ m/min}$ angenommen. Mit t_{LA} ist die Vornahmezeit der Feuerwehr (Löschangriff) bezeichnet.

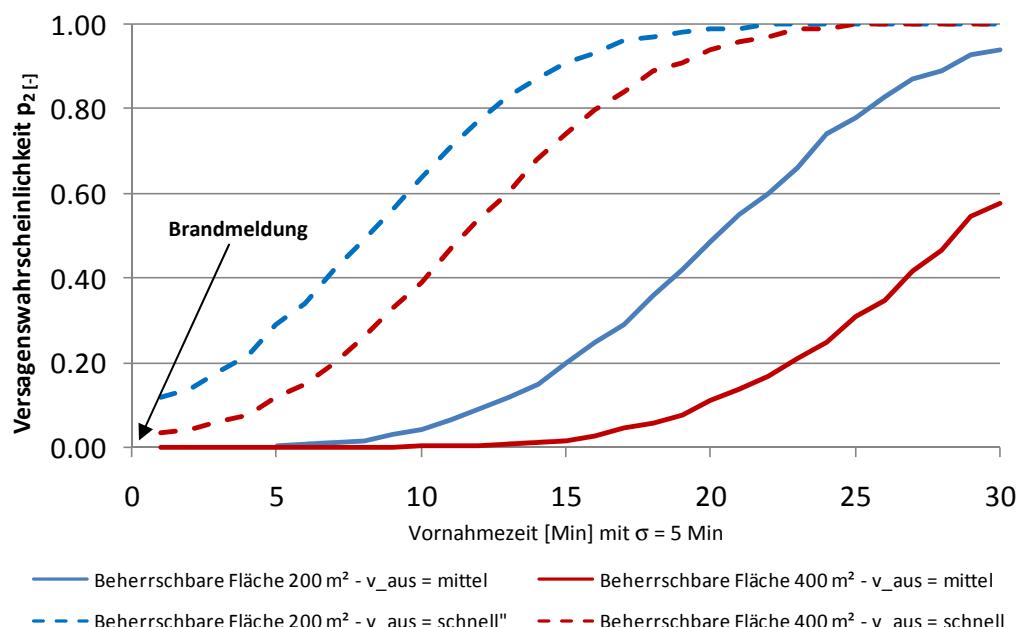


Bild 7.13 Versagenswahrscheinlichkeit von Löschmaßnahmen in Abhängigkeit von Vornahmezeit und beherrschbarer Brandfläche

Angaben über durch die Feuerwehr beherrschbare Brandflächen sind in der Literatur nicht zu finden. Bild 7.13 zeigt die Versagenswahrscheinlichkeiten für Löschmaßnahmen in Abhängigkeit der Eingreifzeit der Feuerwehr (Vornahmezeit) für zwei verschiedene kritische Brandflächen $A_{f,grenz}$ ($200 \text{ m}^2 / 400 \text{ m}^2$). Diese Größe bietet die Möglichkeit der Berücksichtigung unterschiedlich leistungsfähiger Feuerwehren, beispielsweise bedingt durch eine größere Anzahl verfügbarer Staffeln.

Tabelle 7.4 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	15 %	gewählt
Kritische Brandfläche	$A_{f,grenz}$	m^2	Gauß-Normal	400 / 200	60 / 30	15 %	gewählt
Vornahmezeit	t_{LA}	min	Gauß-Normal	10..30	5	17 % - 50 %	gewählt

Den Ergebnissen, die mit Hilfe von FORM/SORM bzw. einer Monte-Carlo Simulation berechnet wurden, liegt bei der Vornahmezeit eine feste Standardabweichung von $\sigma = 5$ Minuten zugrunde, während bei der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und der beherrschbaren Brandfläche jeweils ein Variationskoeffizient von $V = 0,15$ berücksichtigt wurde.

Die im Sicherheitskonzept des Anhangs BB des NA von DIN EN 1991-1-2 enthaltenen Werte für p_2 wurden auf Grundlage des hier beschriebenen Modells mit den angegebenen Eingreifzeiten ermittelt. Für die kritische Brandfläche wurde der mittlere Wert aus Tabelle 7.4 ($A_{f,grenz} = 200 \text{ m}^2$) zugrunde gelegt.

7.6 Literatur

- [7.1] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (M IndBauRL), Fassung März 2000
- [7.2] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Ausgabe Mai 1998
- [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] BRENIG, 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 Kantonaler Versicherungen: Alarmstatistik BMA. Übersicht der echten und unechten Alarne. 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

8 PERSONENSICHERHEIT IN RETTUNGSWEGEN

8.1 Lichtrübende Wirkung des Rauches

Bei der Bewertung der von einem Brand ausgehenden Gefahren spielt das Ausmaß der Verqualmung 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 auftriebsbehaftete Konvektionsströmung transportiert wird, gegebenenfalls beeinflusst von Ventilationsströmungen, die durch Gebäudeöffnungen oder mechanische Ventilationssysteme 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 lichtrübende 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 $D_L [Ob] = 10 \times D_L [m^{-1}]$.

Wichtig für die Anwendung in Nachweisverfahren ist der Zusammenhang zwischen optischer Rauchdichte pro Weglänge und Massenkonzentration des Rauches (Rauchpartikel-Beladung) c_{Rauch} ,

$$D_L = \frac{D_m}{Y_{Rauch}} \cdot c_{Rauch} \quad (8.2)$$

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_{Rauch} 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 eine dimensionslose Größe, manchmal auch 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_{Rauch} eingeht,

$$D_m = K_m \cdot Y_{Rauch} / \ln(10) , \quad (8.3)$$

mit einem typischen Wert für die flammende Verbrennung von Mischbrandlasten (Holz, Kunststoff) für K_m von $7,6 \pm 1,1 \text{ m}^2/\text{g}$ [8.26]. 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_{Rauch} 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.

8.2 Erkennungsweite

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 - 8.3] 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 Ausgleichskurven lassen sich jedoch auch hin zu höheren [8.2] und niedrigeren [8.4] Erkennungsweiten – bis auf etwa 0,5 m (Armeslänge) – extrapoliieren. Die zu beobachtenden Werte für die Konstante C hängen bei selbstleuchtenden Zeichen neben der Rauchzusammensetzung stark von der Leuchtdichte ab, wobei Werte zwischen 5 und 10 beobachtet wurden. Bei lichtreflektierenden 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 (selbstleuchtendes Hinweiszeichen) bzw. 3 (lichtreflektierendes Hinweiszeichen) benutzt [8.4, 8.5].

Bild 8.1 zeigt den Zusammenhang zwischen Erkennungsweite und optischer Rauchdichte 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.

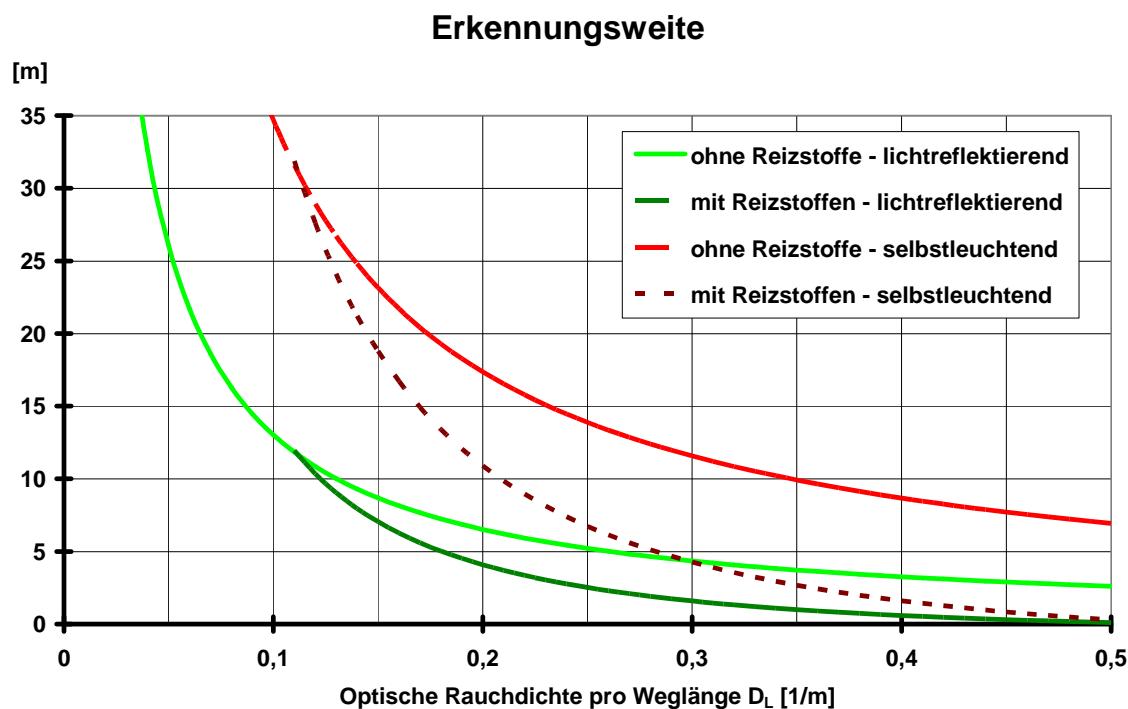


Bild 8.1 Erkennungsweite S als Funktion von D_L

Zwei für die Selbstrettung wichtige Auswirkungen einer durch Rauchbildung reduzierten Erkennungsweite sind die damit verbundene Verlangsamung flüchtender Personen [8.1] sowie Schwierigkeiten bei der Orientierung bzw. generell das Zurückschrecken vor verrauchten Bereichen. Ab einer optischen Rauchdichte D_L von ca. $0,1 \text{ m}^{-1}$ ist in empirischen Studien [8.1] eine deutliche Verlangsamung ortsunkundiger Personen zu bemerken. Diese Aspekte lassen sich in fortschrittlichen Simulationsmodellen berücksichtigen, welche individuelle Bewegungs- und Verhaltensaspekte berücksichtigen [8.7, 8.8].

Detaillierte Angaben zur Berechnung von Erkennungsweiten für Rettungszeichen auf der Basis entsprechender Rauchversuche findet man in [8.23, 8.24]. Allgemein hängt die Erkennungsweite S vom Verhältnis aus Anfangs- und Schwellenkontrast des Sehzeichens und damit dem Verhältnis aus erforderlicher (gesehener) Leuchtdichte L und Anfangsleuchtdichte L_0 ab,

$$S = K^{-1} \cdot \ln(L_0/L) \quad (8.6)$$

Für den Nachweis einer raucharmen Schicht ist eine gesehene Leuchtdichte von $2 - 5 \text{ cd/m}^2$ erforderlich [8.24].

Wie in der Relation von Jin ergibt sich eine $1/K$ -Abhängigkeit der Erkennungsweite, wobei allerdings der empirische Faktor C hier durch den variablen Faktor $\ln(L_0/L)$ ersetzt wurde, welcher Einflußgrößen wie Kontrastverhältnisse und Leuchtstärken explizit berücksichtigt. Da die Leuchten der Allgemein- und Sicherheitsbeleuchtung im Regelfall an der Decke des Raumes angebracht sind und sich damit im Brandfall sehr schnell innerhalb der Rauchschicht befinden, ist diese auf die Leuchtdichte abzielenden Betrachtungsweise von besonderer praktischer Relevanz.

Die Gleichungen (8.4) - (8.6) gelten für homogene Zustände über die Distanz des Lichtstrahls. Treten relevante räumliche Unterschiede in der optischen Rauchdichte auf, muss gegebenenfalls rechnerisch eine angemessene lokale Behandlung der Lichtabschwächung (integrale Zerlegung) durchgeführt werden.

8.3 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 oder des akuten Sauerstoffmangels (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 narkotisierenden Gase sind Kohlenmonoxid (CO), Cyanwasserstoff (HCN) sowie Kohlendioxid (CO_2) [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_i der einzelnen Komponenten CO, HCN, CO_2 sowie O_2 (Sauerstoffmangel) ab:

$$F_{\text{CO}} = \frac{3,317 \cdot 10^{-5} \cdot \text{RMV} \cdot c_{\text{CO}}^{1,036} \cdot \Delta t}{D} \quad (8.7)$$

$$F_{\text{HCN}} = \frac{\Delta t}{\exp(5,396 - 0,023 \cdot c_{\text{HCN}})} \quad (8.8)$$

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta t}{\exp(6,1623 - 0,5189 \cdot c_{\text{CO}_2})} \quad (8.9)$$

$$F_{\text{O}_2} = \frac{\Delta t}{\exp(8,13 - 0,54 \cdot (20,9 - c_{\text{O}_2}))} \quad (8.10)$$

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 $\text{RMV} = 25 \text{ l/min}$. Für einen Erwachsenen in Ruhe erhält man $D = 40\%$ und $\text{RMV} = 8,5 \text{ l/min}$. 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. Genaue 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 jedoch unter dem Gesichtspunkt des rechnerischen Nachweises der Personensicherheit äquivalent sind.

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:

$$F = \max((F_{\text{CO}} + F_{\text{HCN}}) \cdot V_{\text{Hyp}} + F_{\text{O}_2}, F_{\text{CO}_2}) \quad (8.11)$$

mit

$$V_{\text{Hyp}} = \exp(0,2 \cdot c_{\text{CO}_2}). \quad (8.12)$$

8 Personensicherheit in Rettungswegen

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 O₂-Konzentration unterhalb von 13 % zu berücksichtigen sei. Hyperventilation gemäß (8.12) ist laut [8.4] ab einer CO₂-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, 8.25].

Hinsichtlich ihrer Wirkung meist schwieriger einzuschätzen ist die Vielzahl von Reizgasen, die bei einem Brand freigesetzt werden können. Von einigen hochtoxischen Sonderfällen abgesehen gilt jedoch, dass Reizgase die Handlungsfähigkeit nicht in der direkten Weise wie die narkotisierenden Gase beeinflussen. Dagegen beeinträchtigen Reizgase 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].

Da die für Brandsimulationsrechnungen notwendigen Quellterme für die Freisetzung von Reizgasen in wesentlichen Teilen nicht verfügbar sind, ist eine rechnerische Bewertung der Reizgaswirkung mit Hilfe von Ingenieurmethoden zurzeit nicht möglich. Man kann bei Mischbrandlasten davon ausgehen, dass bei einer optischen Dichte pro Weglänge zwischen 0,1 m⁻¹ und 0,2 m⁻¹ reizend wirkende Gasanteile im Brandrauch vorhanden sind, die jedoch für kurze Wegstrecken zumutbar sind. Bei einer optischen Rauchdichte von 0,1 m⁻¹ und darunter kann im Rahmen eines ingenieurmäßigen Nachweises in der Regel davon ausgegangen werden, dass die Rauchgasbestandteile (insbesondere auch die Reizgase) für eine erfolgreiche Selbstrettung unbedenklich sind (siehe Bild 8.2 und [8.7, 8.9, 8.19, 8.20]).

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), welche die ERPG-Werte in den nächsten Jahren ersetzen werden bzw. zum Teil bereits ersetzt haben. Auf die AEGL-Werte bezieht sich auch die vfdb-Richtlinie 10/01 zur Bewertung von Schadstoffkonzentra-

tionen 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 [8.27] zusammengestellt.

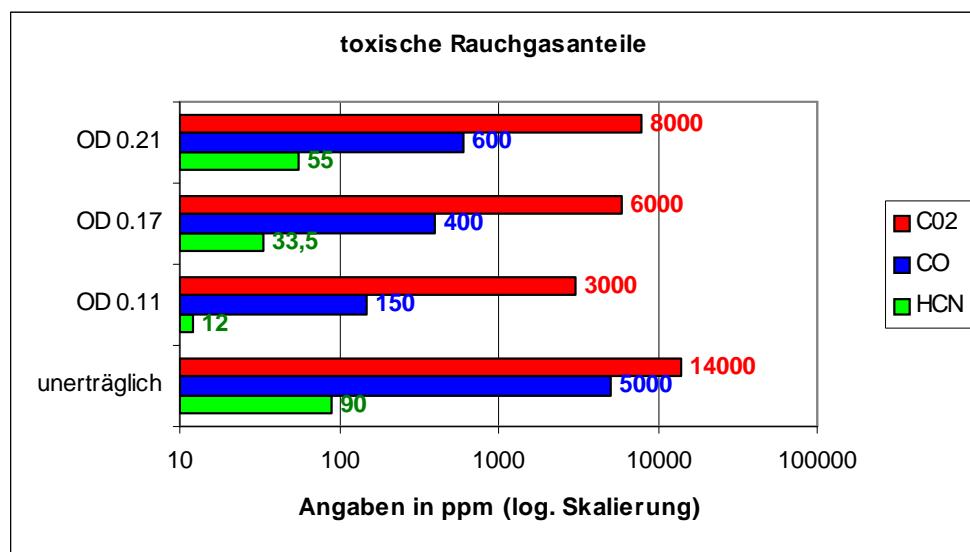


Bild 8.2 Gemessene Verteilungen toxisch wirksamer Gasanteile im Brandrauch [8.9]

8.4 Die thermische Wirkung von Brandgasen

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 Luft-

temperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsduer 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.

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 schmerzhafte 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

$$\tau_{\text{conv}} [\text{min}] = \frac{5 \cdot 10^7}{(T[\text{°C}])^{3,4}} \quad (8.13)$$

für dünn- oder unbekleidete Personen und

$$\tau_{\text{conv}} [\text{min}] = \frac{4,1 \cdot 10^8}{(T[\text{°C}])^{3,61}} \quad (8.14)$$

für vollständig bekleidete Personen [8.4, 8.10].

Bei der Anwendung der Relation (8.13) bzw. (8.14) ist zu prüfen, ob nicht bereits bei niedrigeren Temperaturen (unter Berücksichtigung der Luftfeuchte) Bedingungen für das Eintreten eines thermischen Schocks vorliegen können.

Insbesondere für die nähere Umgebung von großen Flammen und unterhalb von Heißgaschichten 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 $1,7 \text{ kW/m}^2$.

Tabelle 8.1 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
	$2,5 \text{ kW/m}^2$	Schmerz nach	30 s
Konvektion	$< 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (bei H_2O -Sättigung)		$> 30 \text{ min}$
(Atemwege, Haut)	$160 \text{ }^\circ\text{C} (< 10 \% \text{ H}_2\text{O})$	2 min	
	$120 \text{ }^\circ\text{C} (< 10 \% \text{ H}_2\text{O})$	7 min	
	$100 \text{ }^\circ\text{C} (< 10 \% \text{ H}_2\text{O})$	12 min	

Für Bestrahlungsstärken $q > 2,5 \text{ kW/m}^2$ lässt sich die Zeit bis zum Erreichen von Verbrennungen zweiten Grades durch die Beziehung

$$\tau_{\text{rad}}[\text{min}] = \frac{6,9}{(q[\text{kW/m}^2])^{1,56}} \quad (8.15)$$

abschätzen. Die Zeit bis zum Erreichen der Schmerzgrenze, welche nicht notwendiger Weise die Flucht beeinträchtigen muss, lässt sich mit Hilfe von

$$\tau_{\text{rad}}[\text{min}] = \frac{4,2}{(q[\text{kW/m}^2])^{1,9}} \quad (8.16)$$

ermitteln [8.4].

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.

8.5 Anhaltswerte zur Beurteilung der Personensicherheit

An Stelle der in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen aufwendigen Bestimmungs-gleichungen 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 8.2 zusammengestellt. Dabei wurden typische Mischbrandlasten, wie sie im Wohnungs-, Büro- oder Verkaufsstättenumfeld 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 [8.25]. Diese relativ hohe HCN-Ausbeute wurde für die Anhaltswerte in Tabelle 8.2 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 8.2 angegebenen Schadstoff-Grenzwerte – deutlich über 15 Vol.-% liegt (ein Wert, der für sich alleine genommen bei den hier in Frage kommenden Expositionzeiten zu keinen gravierenden Schäden führt), wird die Sauerstoffkonzentration nicht explizit als Beurteilungskriterium aufgeführt.

Im Laufe der Rauchausbreitung durch ein Schadfeuer 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 8.2 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 8.2 angegebenen Akzeptanzwerten für die Gasphase, so dass bei einem Nachweis akzeptabler optischer Rauchdichten in der Regel auch das Temperaturkriterium erfüllt ist.

Die Unterteilung der Tabelle 8.2 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 Aufenthalts-dauer überschritten wird.

In den folgenden Fällen sind gegebenenfalls detaillierte Analysen mit den in Kapitel 8 ge-nannten Methoden erforderlich, bei denen die individuelle dosisabhängige Wirkung berück-sichtigt werden kann:

- die Brandrauchzusammensetzung weicht deutlich von den in Tabelle 8.2 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 auf Fremdrettung angewiesen sind.

Tabelle 8.2 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	0,1 m ⁻¹	0,1 m ⁻¹ / 0,15 m ⁻¹ ⁽³⁾	0,1 m ⁻¹ / 0,2 m ⁻¹ ⁽³⁾
Erkennungsweite ⁽⁴⁾	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 optischen Rauchdichte) als Beurteilungsgröße für die Personensicherheit herangezogen werden.

⁽³⁾ Der jeweils höhere Anhaltswert kann zur Beurteilung angesetzt werden, wenn der betroffene Bereich übersichtlich strukturiert ist oder die Personen mit den Räumlichkeiten vertraut sind.

⁽⁴⁾ Die Erkennungsweite ist starken Streuungen unterworfen. Für typische Brände besteht eine Korrelation mit der Rauchdichte D_L. Näheres dazu siehe Abschnitt 8.2.

Bei einer optischen Rauchdichte pro Weglänge D_L ≤ 0,1 m⁻¹ kann im Rahmen eines ingeniermäßigen 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]. Dies kann somit als Kriterium für den Nachweis einer raucharmen Schicht in den Rettungswegen betrachtet werden.

8 Personensicherheit in Rettungswegen

Bild 8.3 zeigt den Verlauf des auf 1 normierten FED-Quotienten (siehe Relation (8.11)) für die Anhaltswerte aus Tabelle 8.2, bezogen auf die Belastungsgrade starke Belastung bzw. besonders empfindliche Personen ($D = 20\%$, $RMV = 50\text{ l/min}$), leichte Belastung ($D = 30\%$, $RMV = 25\text{ l/min}$) und Ruhe ($D = 40\%$, $RMV = 8,5\text{ l/min}$). Die Anhaltswerte aus Tabelle 8.2 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.

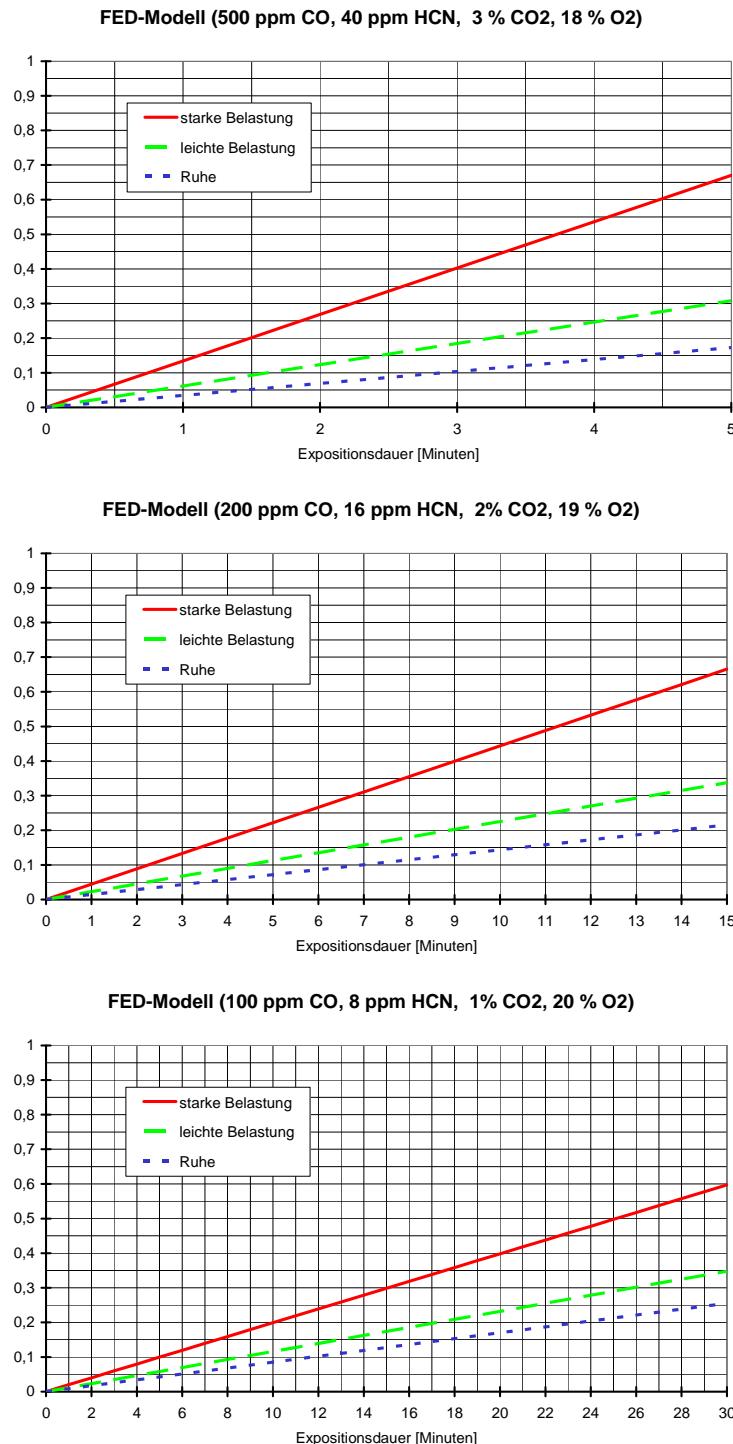


Bild 8.3 FED-Quotienten für die Anhaltswerte aus Tabelle 8.3

8.6 Literatur

- [8.1] *JIN, T.*: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd Ed. 2002.
- [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 13571:2007 Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data, 15.6.2007
- [8.5] *MULHOLLAND, G. W.*: Smoke Production and Properties. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2nd Ed. 1995.
- [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.*: Toxicity Assessment of Combustion Products. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd Ed. 2002.
- [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 Personensicherheit in Rettungswegen

- [8.14] vfdb-Richtlinie 10 / 03 – Schadstoffe bei Bränden. vfdb-Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, 3 (1997) 102.
- [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] 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.
- [8.26] MULHOLLAND, G.W.; CROARKIN, C.: Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke, Fire and Materials 24 (2000) 227.
- [8.27] FORELL, B.: Einteilung, Quellterme und Bewertung der akuten Toxizität von Brandrauch. vfdb-Jahresfachtagung, Mannheim, 2009.

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.

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 Entfluchtungsmodelle 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 Räumungszeit $t_{Räumung}$ kleiner sein muss als die verfügbare Räumungszeit $t_{verfügbar}$.

$$t_{Räumung} < t_{verfügbar} \quad (9.1)$$

Dabei ist darauf zu achten, dass durch die Wahl geeigneter Brandszenarien und Akzeptanzkriterien in $t_{verfügbar}$ implizit ein ausreichender Sicherheitsfaktor enthalten ist. Andernfalls (z. B. bei der Bestimmung von $t_{verfügbar}$ auf der Basis von Erträglichkeitsgrenzen) muss ein entsprechender Sicherheitsfaktor zusätzlich berücksichtigt werden. Explizite Sicherheitszuschläge auf $t_{Räumung}$ sind nötig, wenn z. B. mobilitätseingeschränkte Personen nicht direkt in den angewandten Rechenverfahren berücksichtigt werden können, wenn bedeutsame Details der Raumgeometrie nicht direkt erfasst werden oder wenn das eingesetzte Rechenverfahren nur mittlere oder optimierte Räumungszeiten berechnen und somit keine Schwankungsbreiten der Räumungszeiten angeben kann.

Die Räumungszeit $t_{Räumung}$ setzt sich zusammen aus der Zeitspanne $t_{Detektion}$ 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_{Flucht} vom Beginn der Fluchtbewegung bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches,

$$t_{\text{Räumung}} = t_{\text{Detektion}} + t_{\text{Alarm}} + t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{Flucht}} \quad (9.2)$$

Fortschrittliche Simulationsmodelle sind in der Lage, die Fluchtzeit t_{Flucht} konsistent aus der individuellen Bewegung aller beteiligten Personen zu bestimmen. Einfachere Verfahren berechnen t_{Flucht} näherungsweise 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 („pre-movement time“) 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. Die folgenden quantitativen Angaben folgen der Kategorisierung nach Purser [9.1].

Die individuellen Reaktionszeiten innerhalb einer Personengruppe folgen typischerweise einer Verteilung, wie sie in Bild 9.1 schematisch dargestellt ist.

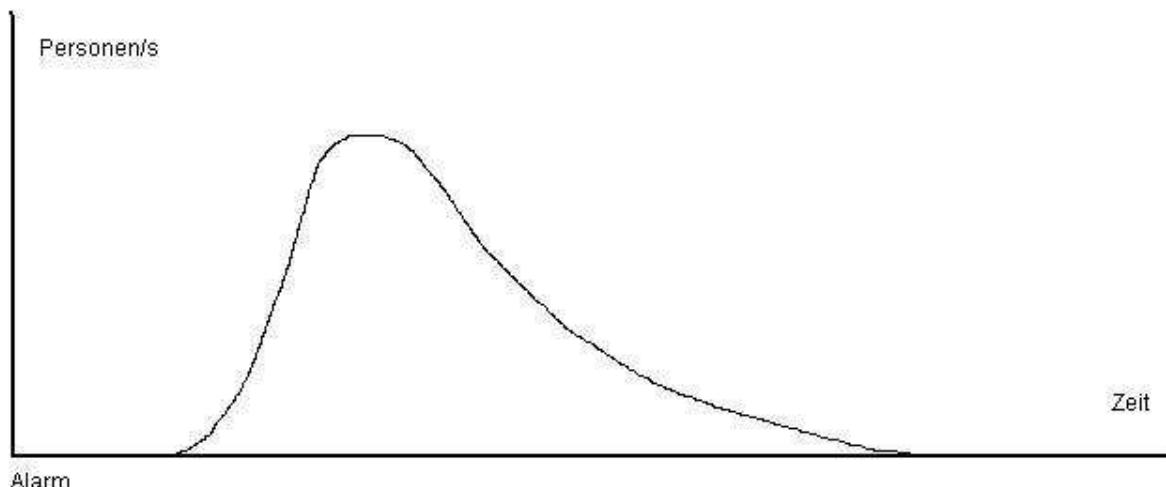


Bild 9.1 Schematische Darstellung einer typischen Reaktionszeit-Verteilung

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 Flucht-

bewegung beginnen, zunächst steil an, erreicht ein Maximum und klingt dann langsam ab. Der Zeitpunkt des beginnenden Anstiegs (der Beginn der individuellen Reaktionszeit) lässt sich durch die 1 Perzentile Δt_1 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 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	Nutzungsart
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 zeitverzögter 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, eine Gefahrenabwehr- und Notfallplanung sowie regelmäßige Schulungen und Räumungsübungen. In öffentlich zugänglichen Bereichen muss in Sicherheitsfragen geschultes Personal in relativ hoher Zahl vorhanden sein. Eine unabhängige Überprüfung und Bewertung des Sicherheitssystems und der zugehörigen Verfahrensweisen ist notwendig. In öffentlich zugänglichen Bereichen ist ein Lautsprecher- system vorzusehen.
M2	wie M1, jedoch mit einem geringeren Anteil an geschultem Personal. Brandschutzhelfer und eine unabhängige Prüfung / Bewertung des Sicherheitssystems 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

Szenarium (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))
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 Entfluchtungsmodelle

Ähnlich den Raumbrandmodellen findet man auch bei den Entfluchtungsmodellen sehr unterschiedliche Verfahren – von einfachen Handformeln bis hin zu komplexen rechnergestützten Simulationsmodellen. Es lassen sich dabei zwei Hauptgruppen unterscheiden:

- hydraulische Modelle (Strömungsmodelle) – inklusive Netzwerkmodelle,
- Individualmodelle (mikroskopische Modelle).

Die hydraulischen Modelle lassen sich weiter unterteilen in vereinfachte Berechnungsansätze zur Kapazitätsanalyse („Handrechnungen“) sowie Verfahren, welche auch die Dynamik der Bewegung einer größeren Menschenmenge näherungsweise berücksichtigen. Diese Methoden werden oft angewandt, da sie sich auf die für die Bewegung eines kompakten Personenstroms bedeutsamen Elemente der Rettungswegführung beschränken. Die Berechnungsschritte sind damit in der Regel übersichtlich und leicht nachzuvollziehen. Gemeinsam sind den hydraulischen Modellen die folgenden Grundannahmen [9.2]:

- Alle Personen beginnen gleichzeitig mit der Räumung.
- Es gibt keine Unterbrechungen in dem sich mit Beginn der Räumung ausbildenden Personenstrom (z. B. durch individuelle Handlungsentscheidungen).
- Alle Personen sind ausreichend mobil, so dass sie mit der Gruppenbewegung mithalten können.

Diese Grundannahmen sind von optimistischer Natur. Zusammen mit den notwendigen Vereinfachungen bei der Berücksichtigung der Gebäudegeometrie ergeben sich so Unsicherheiten, die insbesondere bei den einfacheren hydraulischen Modellen (Ansätze zur Kapazitätsanalyse) entsprechend berücksichtigt werden müssen (z. B. durch geeignete Sicherheitszuschläge).

Um die Einschränkungen der hydraulischen Modelle zu reduzieren und um den individuellen Einfluss auf die Effizienz der Entfluchtung stärker zu betonen, wurden die sogenannten Individualmodelle (mikroskopische Evakuierungsmodelle) entwickelt, welche die Bewegung einzelner Personen in einer möglichst realitätsnahen Umgebung simulieren und die sich zwischenzeitlich auch in der Anwendungspraxis bewährt haben [9.30].

9.4.1 Abschätzung von Räumungszeiten durch Handrechnungen

Diese Berechnungsansätze basieren auf Relationen, welche die Kapazität eines Wegelementes (Ausgang, Treppe oder Korridor) in Abhängigkeit von seiner Breite und gegebenenfalls auch anderen Parametern (z. B. Stufenabmessungen) beschreiben.

Grundlegende Eingabegrößen für solche Handrechnungen sind die Weglänge L und Fluchtwegbreite B sowie die zugehörigen (mittleren) horizontalen Gehgeschwindigkeiten V und Personenströme F. V und F hängen von der Personendichte D ab, welche sich ortsabhängig

im Laufe der Zeit verändert. Da jedoch diese Dichteabhängigkeit ohne eine aufwändige Modellierung des dynamischen Verhaltens einer Menschenmenge nur angenähert angegeben werden kann, bezieht man sich bei der Berechnung von Räumungszeiten mittels Kapazitätsanalyse in der Regel nur auf eine für das Szenarium typische mittlere Personendichte. Im SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [9.3, 9.4] werden 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 Staubildungen die Fluchtweg- bzw. Ausgangsbreiten ein wesentlicher Bemessungsfaktor sind, sind in der Regel nur die Optionen „Moderate“ (moderat) oder „Optimum“ (optimal) einzusetzen, die 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.

Tabelle 9.6 zeigt Referenzwerte der ebenerdigen unbehinderten Gehgeschwindigkeit 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. In der Praxis wird man für Auslegungszwecke meist die Parameter für moderate Auslastung wählen, auch wenn höhere Dichten zumindest zeitweise erwartet werden können. Man erhält so konservative Ergebnisse für die Räumungszeit. Ausnahmen sind z. B. die Bewegung auf (vollbesetzten) Tribünen und ähnliche Situationen, bei welchen die Personendichte wegen der besonderen Art der Nutzung an dem zu passierenden Querschnitt (z. B. Mundloch) zwangsläufig überwiegend im Bereich höherer Dichten liegt.

Tabelle 9.6 Horizontale Gehgeschwindigkeit und spezifischer Personenstrom für bestimmte Wegelemente [9.3, 9.4], umgerechnet in SI-Einheiten.

Wegelement	Gehgeschwindigkeit 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 Gehgeschwindigkeit 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 Breiteneinheit passieren können. Dabei ist die Auslastung des Wegelementes als Randbedingung zu berücksichtigen.

Die Fluchtzeit t_{Flucht} ergibt sich nun aus der größeren der beiden Zeiten, entweder der für den zurückzulegenden Weg t_{Weg} oder der Zeit für das Passieren des Wegelementes mit der geringsten Durchlasskapazität t_{Passage} ,

$$t_{\text{Flucht}} = \max \begin{cases} t_{\text{Passage}} \\ t_{\text{Weg}} \end{cases}. \quad (9.3)$$

Bei der Zeit für den zurückzulegenden Weg ist der längste Weg L_{\max} von einer möglichen Startposition bis zum Endpunkt des betrachteten Wegelementes anzusetzen,

$$t_{\text{Weg}} = \frac{L_{\max}}{V}. \quad (9.4)$$

Bei der Passagezeit ist neben der Breite B des Wegelementes und der Gesamtzahl N der dieses Wegelement passierenden Personen der kürzeste Weg L_{\min} von einer möglichen Startposition bis zum Zielpunkt (also die Ankunftszeit der ersten Person) zu berücksichtigen,

$$t_{\text{Passage}} = \frac{L_{\min}}{V} + \frac{N}{F_s \cdot B}. \quad (9.5)$$

Enthält der zu analysierende Weg unterschiedliche Elemente (unterschiedliche Typen oder gleiche Typen mit unterschiedlichen Breiten), so ist für L_{\min} die Summe der Wegstücke und für die Durchgangszeit $N/(F_s \cdot B)$ die längste der für die unterschiedlichen Wegelemente ermittelten Zeiten anzusetzen.

Alternativ lässt sich die Passagezeit auch auf der Basis des Modells der effektiven Breite („effective width model“) bestimmen [9.2]. Die effektive Breite B_{eff} berücksichtigt den Umstand, dass Personen in der Regel nicht die gesamte verfügbare geometrische Breite ausnutzen, sondern einen gewissen, empirisch zu bestimmenden, Mindestabstand zu den Begrenzungen einhalten. Beispielsweise ist die effektive Breite einer Treppe ohne Handlauf gegenüber der verfügbaren geometrischen Breite um $2 \times 15 \text{ cm} = 30 \text{ cm}$ reduziert.

Um die Passagezeit zu berechnen, muss nun in Gleichung (9.5) B durch B_{eff} und F_s aus Tabelle 9.6 durch einen auf die effektive Breite bezogenen spezifischen Personenstrom ersetzt werden, der in der Regel geringfügig über demjenigen aus Tabelle 9.6 liegt. Damit wird die gegenüber B geringere Breite B_{eff} teilweise kompensiert, so dass beide Ansätze für Anwendungen, in denen die Breite B deutlich größer ist als die zugehörigen Randschichten, ähnli-

che Resultate liefern. Liegt dagegen B in einem Bereich kleiner als ungefähr 1,2 m, ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen beiden Methoden. So erhält man z. B. für eine Tür von 1,0 m Breite mit dem Modell der effektiven Breite einen Personenstrom von 55 P./min, mit dem Ansatz nach Tabelle 9.6 dagegen 84 P./min, jeweils berechnet für eine optimale Auslastung.

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“.

Es empfiehlt sich, für komplexere Szenarien die Berechnungsschritte in Form einer Tabelle zusammenzufassen, in der die Personenzahl, Art des Weges, Weglängen und -breiten, gegebenenfalls weitere zu berücksichtigende Einflussfaktoren (z. B. Begrenzung der Gehgeschwindigkeit oder Blockade von Wegelementen wegen Rauchausbreitung) sowie die zugehörigen Passage- und Wegzeiten aufgeführt sind.

9.4.2 Dynamische Strömungsmodelle und Netzwerkmodelle

Will man im Rahmen des hydraulischen Ansatzes genauer vorgehen, so kann man empirisch abgeleitete Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit V und Dichte D benutzen, um die Auswirkungen von örtlich und zeitlich veränderlichen Personendichten zu beschreiben. Dies führt zu der Gruppe der dynamischen Strömungsmodelle.

Im Rahmen des Modells der effektiven Breite wird so auf der Grundlage empirischer Daten eine funktionale Abhängigkeit von Geschwindigkeit V und Personendichte D abgeleitet [9.2],

$$V = k - a \cdot k \cdot D. \quad (9.6)$$

Den spezifischen Personenstrom F_s erhält man durch Multiplikation von Geschwindigkeit und Dichte,

$$F_s = V \cdot D. \quad (9.7)$$

Die Konstanten $a = 0,266 \text{ m}^2/\text{P.}$ und k (siehe Tabelle 9.7) werden empirisch festgelegt. Der Gültigkeitsbereich von (9.6) 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 und 2 P./m^2 . D. h. der in Relation (9.6) 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 (9.6) 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 (9.6) in (9.7) ein, ergibt sich für F_s eine quadratische Abhängigkeit von D, mit einem Maximum bei einer Personendichte von 1,9 P./m². Dies entspricht dem optimalen Auslastungsgrad, der oft in Handrechnungen eingesetzt wird.

Mit Hilfe der Gleichungen (9.3) bis (9.7) und zusätzlichen Regeln (teils direkt aus dem hydraulischen Modell 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. 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 Laufebene 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 Fluchtwiege 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]. Es existiert eine Umsetzung der Methode von Predtetschenski und Milinski in das Computerprogramm EESCAPE (Emergency Escape) [9.7].

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 Fluchtwiege enthält. Da die Durchlassfähigkeit der Knoten durch empirische Relationen für die Dichteabhängigkeit des spezifischen Personenstroms bestimmt wird, sind diese Verfahren den hydraulischen Modellen zuzuordnen. Sie eröffnen allerdings die Möglichkeit, auch bestimmte Aspekte der individuellen Bewegung zu berücksichtigen (z. B. Mobilitätseinschränkungen oder Wahlmöglichkeiten bei Fluchtwegalternativen), wie etwa in den Modellen EXIT89 [9.8] oder EVACNET4 [9.9].

9.4.3 Individualmodelle

Viele Schwierigkeiten bei der Anwendung der hydraulischen Modelle lassen sich vermeiden, wenn man an die Stelle des abstrakten makroskopischen Personenstroms die konsistente Bewegung von Einzelpersonen (mikroskopischer Ansatz) setzt. Insbesondere ist es bei den fortschrittlicheren Individualmodellen nicht mehr nötig, die Dichteabhängigkeit der Gehgeschwindigkeit vorzugeben. Dieser zentrale, die Räumungszeit wesentlich beeinflussende Zusammenhang ist hier vielmehr ein Ergebnis der Modellierung elementarer individueller Bewegungsabläufe. Vorzugeben sind nur noch die persönlichen Mobilitätsparameter, Parameter zur Charakterisierung bestimmter Verhaltensweisen (z. B. Fluchtwegwahl) sowie die geometrische Struktur des Objektes, in welchem die Personen sich bewegen.

Man unterscheidet zwei Typen von Individualmodellen: räumlich kontinuierliche und räumlich diskrete Modelle. Bei den räumlich diskreten 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. Bei den kontinuierlichen 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. Kontinuierliche Modelle bieten daher ein großes Maß an Flexibilität, erfordern dafür jedoch in der Regel eine höhere Rechenkapazität. Es ist jedoch ohne Weiteres möglich, mit den heute verfügbaren Personal Computern Szenarien mit deutlich mehr als 10.000 Personen auch mit kontinuierlichen Individualmodellen zu berechnen.

Die meisten Individualmodelle enthalten die Möglichkeit, neben der Anfangsverteilung der Personen auch bestimmte individuelle Entscheidungen im Ablauf der Simulation zufallssteuert zu bestimmen. Damit erhält man bei der mehrfachen Berechnung des gleichen Szenariums 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], EGRESS [9.5] oder PedGo [9.11]. Den kontinuierlichen Ansatz verfolgen die Simulations-

programme ASERI [9.12] und SIMULEX [9.13]. Eine umfassende Übersicht derzeit verfügbarer Evakuierungsmodelle findet man unter www.firemodelsurvey.com.

9.4.4 Modellauswahl und Anwendungsgrundsätze

Ein leistungsfähiges und aussagekräftiges Entfluchtungsmodell 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 Entfluchtung 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 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 Fluchtwegealternativen zulassen.

Für eine Bemessung geeignete Räumungszeiten erhält man durch eine angemessen konservative Wahl des Szenariums (z. B. hinsichtlich der Personenzahl oder der individuellen Mobilitätsparameter) und der Berechnungsparameter (z. B. moderate statt optimale Auslastung im hydraulischen Modell) sowie gegebenenfalls durch eine statistische Auswertung (ungünstigster Räumungsverlauf oder Vorgabe eines geeigneten Vertrauensintervalls). Ansonsten sind ausreichende Sicherheitszuschläge anzusetzen.

Bei mikroskopischen Entfluchtungsmodellen können in der Regel Startzeit und die zeitliche Spreizung separat individuell zugeordnet werden und somit direkt aus Tabelle 9.5 übernommen werden. Bei vereinfachten Verfahren zur Berechnung von Räumungszeiten ist die

Reaktionszeit eine additive Größe, die mit Hilfe der Angaben in Tabelle 9.5 abgeschätzt werden kann.

Die Verwendung computergestützter Individualmodelle erfordert hohe Sorgfalt bei der Auswahl der mitunter vielfältigen Einstellparameter. Hier ist seitens der Modellentwickler eine ausführliche und umfassende Validierung und Dokumentation zu fordern, 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 inhomogene Personengruppe der gleichen durchschnittlichen Parameter. Die Verlangsamung des Personenstroms durch stattfindende Überholvorgänge kann prinzipiell nur mit einem Individualmodell erfasst werden. Ein anderes Beispiel sind Kurven oder Ecken im Rettungswegverlauf bzw. der Einfluss der Anströmrichtung auf Türen oder Treppen, der bei den Strömungsmodellen nicht betrachtet wird, sich bei Individualmodellen aber durchaus auswirkt. Schließlich lassen sich Parameterstudien bei einmal erstellter Geometrie leichter durchführen und visualisieren.

Wie in 9.1 beschrieben, kann die mit Entfluchtungsmodellen berechnete erforderliche Räumungszeit direkt mit Hilfe der (z.B. aus Rauchausbreitungsrechnungen ermittelten) verfügbaren Räumungszeit beurteilt werden. Daneben spielt jedoch auch die Qualität des Räumungsablaufs, insbesondere die Entwicklung der lokalen Personendichte auf den Rettungswegen und mögliche Stausituationen, eine wichtige Rolle. Staubbildungen werden sich nicht grundsätzlich vermeiden lassen. Solange sie sich zu Beginn der Entfluchtung im Übergang vom ursprünglichen Aufenthaltsbereich zu den Rettungswegen (geschützter Flur oder Fluchttreppen) ausbilden, sind diese akzeptabel (unter der Voraussetzung, dass die verfügbare Räumungszeit größer ist als die erforderliche Räumungszeit). Innerhalb der Rettungswege sollten Staubbildungen dagegen vermieden werden. Nicht akzeptabel sind Staubbildungen in unübersichtlichen Bereichen, da hier für die in dem Stau befindlichen Personen ein deutlich erhöhtes Maß der Gefährdung durch nachrückende Flüchtende besteht (Staudruck). Kriterien zum Nachweis eines „sicheren Fluchtverlaufs“ werden in [9.31] diskutiert.

Eine detaillierte Übersicht über die Erstellung eines Evakuierungskonzeptes unter Berücksichtigung menschlichen Verhaltens und des Einsatzes von Rechenverfahren bietet z. B. [9.14].

9.4.5 Validierung

Für den Einsatz eines Entfluchtungsmodells 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 (z. B. Laufgatterversuche [9.15]),

- Vergleiche mit Räumungsübungen,
- Vergleiche mit realen Räumungssereignissen,
- Vergleiche mit anderen ausreichend validierten Rechenverfahren.

Um bestimmte Aspekte individuellen Verhaltens (z. B. Reaktionszeit oder Fluchtwegewahl) 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. mehrere Modelle, darunter das Modell von Predtetschenski und Milinski sowie – als Vertreter der Klasse der mikroskopischen Modelle – das Simulationsprogramm ASERI 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

Das individuelle Verhalten im Brandfall kann in allen Phasen der Entfluchtung 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) 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).

Äußerst wichtig für den Ablauf der Räumung ist das Verhalten der Personen im Falle von Fluchtwegalternativen. Bei der Wahl des Fluchtweges sind verschiedene Einflussfaktoren (Ortskenntnis, für das Betreten des Gebäudes benutzter Weg, Markierungen, Fluchtleitsystem, Informationssystem, Akzeptanz von Notausgängen, Einwirken von Personal) zu beachten. Unter Umständen kann es dabei zu einer ungleichmäßigen Auslastung von Fluchtwegen kommen, mit entsprechenden Konsequenzen für die Gesamträumungszeit. In der Praxis wird man daher für ein bestimmtes Szenarium in der Regel verschiedene Auslastungsvarianten untersuchen müssen.

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, sind im Zusammenhang mit der Räumung von Gebäuden äußerst selten anzutreffen. Dagegen wird insbesondere in den Medien sehr häufig ohne die notwendige Differenzierung der Begriff „Panik“ zur Beschreibung oder als Erklärungsmuster entsprechender Vorfälle mit Personenschäden herangezogen. Solche Berichte sind ohne eine genauere Analyse des tatsächlichen Hergangs jedoch ungeeignet für weiterreichende Schlussfolgerungen. Ein tragisches, in seinen Grundzügen jedoch durchaus typisches Beispiel ist das Unglück vom 21. Juli 2001 auf einer Fußgängerbrücke in Akashi, Japan. Dabei wurden 11 Menschen getötet und viele verletzt. Während in den Medien vor allem ein vermeintlich irrationales Verhalten der Betroffenen hervorgehoben wurde

(„stampede“), blieb die eigentliche Ursache (ein 6 m breiter Zugang zu dem ca. 100 m langen und 6 m breiten Steg auf der einen Seite, ein scharfer Knick und Übergang zu einer nur 3,6 m breiten Treppe auf der anderen Seite der Brücke – in Kombination mit einem sehr hohen Personenstrom anlässlich eines Großereignisses) meist ungenannt.

Tatsächlich wird von Experten auf dem Gebiet des menschlichen Verhaltens im Brandfall immer wieder das überwiegend zögerliche oder altruistische Verhalten gegenüber dem oft behaupteten dominanten egoistischen oder irrationalen Verhalten betont. Oft wird mit dem Begriff „Panik“ das lokale Auftreten extrem hoher Personendichten assoziiert, bei der es zu ernsthaften Verletzungen oder gar Todesfällen kommen kann. 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 (wie etwa in dem zuvor genannten Unglück auf der Brücke in Akashi) ist durch die geeignete Planung von Wegführung und Ausweichmöglichkeiten im Rahmen eines umfassenden Sicherheitskonzepts sicherzustellen, welches gegebenenfalls auch geeignete organisatorische Maßnahmen einschließt.

Durch die Anwendung von Entfluchtungsmodellen sollen also mögliche Problemsituationen vorhersehbar gemacht und die Untersuchung von Alternativen ermöglicht werden. Spezielle Modelle zur Berechnung der Konsequenzen extrem hoher Personendichten (im Bereich der Stillstandsdichte), können – sofern sie ausreichend validiert sind – unter Umständen Hinweise auf lokale Maßnahmen zur Erhöhung der Personensicherheit geben, nicht jedoch für die Bemessung und Auslegung von Fluchtwegen in einem Gebäude eingesetzt werden.

Einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand zum Verhalten von Menschen bei Bränden bieten die Veröffentlichungen [9.18 - 9.24].

9.6 Personenzahl

Die Personenzahl, die einem Sicherheitskonzept bzw. einer Entfluchtungsberechnung 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 9.8 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 - 9.28]. Die dort gemachten Anga-

ben 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 Nettofläche (Fläche innerhalb des inneren Umfangs der Außenwände, abzüglich Treppenhäuser, Liftanlagen, Sanitäranlagen, Innenwände etc.).

Tabelle 9.8 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

Tabelle 9.8 Personenbelegung für verschiedene Nutzungsarten (Fortsetzung) *)

Nutzung	Personendichte [P./m ²]
Verkaufsgeschäfte	
- Bereich (Geschoss) mit Zugang ebenerdig	0,5
- sonstige Geschosse	0,3
Einkaufsmarkt (für Großgeräte, Möbel, etc.)	0,1
Ausstellungsraum	0,2
Büro	0,2
Schwimmbad	
- Wasserbecken	0,2
- Ruhe- und Spielbereich	0,35

*) Hinweis: Da aus den zugrunde liegenden Quellen [9.25 - 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.

9.7 Literatur

- [9.1] PURSER, D.: Data Benefits. Fire Prevention Fire Engineers Journal, August 2003, pp. 21 - 24.
- [9.2] NELSON, H. E.; MOWRER, F. W.: Emergency Movement. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd Ed. 2002.
- [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] PROULX, G.: Movement of People: The Evacuation Timing. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd Ed. 2002.
- [9.5] KETCHELL, N. ET AL.: The EGRESS Code for human movement and behaviour in emergency evacuations. in: Smith, R. A.; Dickie, J. F. (Ed.): Engineering for Crowd Safety, Elsevier Science Publishers B.V., 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 Fluchtwiege in Gebäuden. vfdb-Zeitschrift 2 / 86, S. 48 - 54.

- [9.8] FAHY, R. F.: EXIT89. An Evacuation Model for High-Rise Buildings. Proceedings of the Third International Symposium. Cox, G.; Langford, B. (Ed.), International Association for Fire Safety Science, 1991, S. 815 - 823.
- [9.9] KISKO, T. M.; FRANCIS, R. L.: Evacnet+. A Building Evacuation Computer Program. Fire Technology Vol. 22 No. 1, pp. 75 - 76, February 1986.
- [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.: Crowd Safety and Disasters in Complex Settings. The Silver Jubilee Conference of the University of Bradford, 1991.
- [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 Brandschutzbüchern“ VKF, Braunschweiger Brandschutz-Tage 2005.
- [9.29] *STEGLICH, M.; WILK, E.*: Bestimmung der Zeiten für den Ausstieg von Personen aus Zugeeinheiten 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.*: Personensicherheit in Versammlungsstätten – Kritische Analyse und Verbesserungsvorschläge. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage '07, Tagungsband. Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 199. S. 143-170, 2007.
- [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.

10 RISIKOMETHODEN UND SICHERHEITSKONZEPT

10.1 Allgemeines

Voraussetzung für die Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz ist die Aufrechterhaltung des gewohnten brandschutztechnischen Sicherheitsniveaus, das sich über einen längeren Zeitraum anhand der jährlichen Anzahl der Brandtoten und der Brandschadenssummen festmachen lässt. Um dies zu gewährleisten, müssen 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
 - Gebäudebenutzer und
 - Feuerwehrleute sowie die
- Dimensionierung der Brandschutzmaßnahmen so, dass
 - Todesopfer vermieden und
 - Folgen des Konstruktionsversagens minimiert werden.

Naturgemäß vermittelt ein Sicherheitskonzept zwischen der im öffentlichen Interesse liegenden Sicherheit einerseits und der gebotenen 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 ingenieurmäßigen 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 Teilsicherheitsbewerte 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 und skandinavischer Ausland 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 Brandeintrittshäufigkeit, zur Brandausbreitungswahrscheinlichkeit und der Zuverlässigkeit von baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen in Deutschland Mangelware. Hier ist man auf internationale Literaturangaben angewiesen, deren Übertragbarkeit auf deutsche Verhältnisse nicht gesichert ist.

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:

- Semi-quantitative *Index-Methode* [10.2]
- Quantitative *Ereignisbaumanalyse* [10.2]
- Quantitative *Systemzuverlässigkeitsanalyse* [10.3].

Im Folgenden werden zunächst im Kapitel 10.2 die für ingenieurmäßige 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

10.2.1 Einführung

Die Index-Methoden oder Ranking-Methoden stellen vereinfachte Verfahren dar, mit denen das Brandrisiko in einer Vielzahl von Gebäuden grob abgeschätzt und verglichen werden kann. In den letzten Jahrzehnten wurden Index-Methoden für unterschiedliche Anwendungsbereiche entwickelt (Tabelle 10.1).

Als Ergebnis der Bewertung wird eine Zahl, der Risk-Index, ermittelt. Bei Änderungen in der baulichen Struktur oder bei den anlagentechnischen Maßnahmen wird mit dem Verfahren erneut der Risk-Index errechnet und mit dem vorherigen Wert verglichen wird. Auf diese Weise kann man sich iterativ einem Grenzwert annähern, der als Maß für das von der Gesellschaft (oder im Einzelfall) akzeptierte Risiko festzulegen ist. Beim Vergleich der Zahlen-

werte 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 Risiko, sondern lediglich Relativaussagen, wie sicher ein Gebäude im Vergleich zu einem anderen bzw. vor und nach einer Ertüchtigung ist.

Tabelle 10.1 Anwendung semi-quantitativer 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	Münchener Rück-Versicherung [10.6]
Hierarchical Approach	unterschiedliche Gebäude	University of Edinburgh [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, 10.10]
Fire Risk Index Method (FRIM)	mehrgeschossiges Wohngebäude	Lund University, Schweden [10.11, 10.12, 10.13]

Die Index- oder Ranking-Methoden sind halb-quantitative Methoden, die häufig mit dem Ziel einer vereinfachten, schematisierten Risikoeinstufung für bestimmte Gebäudearten entwickelt wurden. Dabei liegt ein großer Teil der Verantwortung für die Einstufung beim Entwickler, weil nur ihm bekannt ist, wie die Bewertungsfaktoren im Modell festgelegt und miteinander verknüpft wurden.

Bei der Entwicklung wird in der Regel 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 Technologie einfach in das System einzuführen. Bei der Anwendung der Methode sind Spezialisten nicht gefordert.

Index-Methoden werden seit über 50 Jahren im Brandschutz verwendet. Es stehen Methoden zur Lebensrettung in Wohngebäuden [10.14], Hochhäusern [10.11], Hotels [10.15] sowie beim Gebäudeschutz von Industriegebäuden [10.8] zur Verfügung.

10.2.2 Index-Methode

Der erste Schritt bei der Entwicklung einer Index-Methode ist, die hierarchischen Ebenen festzulegen. Tabelle 10.2 zeigt eine typische Fünfer-Hierarchie aus [10.14], die in vielen unterschiedlichen Anwendungen verwendet worden ist.

Tabelle 10.2 Ebenen der Entscheidungsfindung nach [10.14]

Ebene	Name	Beschreibung
1	Policy	Course or general plan of action adopted by an organisation to achieve safety against fire and its effects
2	Objectives	Specific fire safety goals to be achieved
3	Strategies	Independent fire safety alternatives, each of which contributes wholly or partly to the fulfilment of fire safety objectives
4	Parameters	Components of fire risk that are determinable by direct or indirect measure or estimate
5	Survey items	Measurable feature that serves as a constituent part of a fire safety parameter

Beim Brandschutz, z. B. in denkmalgeschützten Gebäuden, könnte unter „Politics“ verstanden werden, dass das Brandschutzniveau den Anforderungen in den Baubestimmungen entsprechen sollte oder dass das Sicherheitsniveau dem anderer Gebäude derselben Kategorie gleichwertig sein sollte. Die Ebene „Objectives“ könnte als der „Schutz von Menschenleben“ angesehen werden, mit „Strategies“ könnten Anforderungen zur „Sicherstellung der Flucht und Rettung“ gemeint sein, die z. B. mit dem „Parameter“ Brandmeldeanlage umgesetzt werden soll, wobei als „Survey item“ die Art der Brandmeldeanlage von Bedeutung ist.

Das Ordnen von Brandsicherheitsparametern hinsichtlich ihrer Wertigkeit erfolgt in vier Schritten [10.14]:

1. Zuordnung der Brandsicherheitsklassen zu den hierarchischen Ebenen entsprechend Tabelle 10.2

2. Spezifizierung von Einzelanforderungen entsprechend den Ebenen in Tabelle 10.2
3. Verknüpfung und Zuweisung von Werten in Form von Matrizen für jeweils zwei Ebenen entsprechend Tabelle 10.2
4. Zusammenfassung der Matrizen in einem Lösungssystem, um die Ebenen „Politics“, „Objectives“, „Strategies“ und „Parameters“ miteinander zu verknüpfen.

Ein Beispiel für Schritt 1 ist in Tabelle 10.2 dargestellt. Schritt 2 erfordert Listen mit „Objectives“, „Strategies“, „Parameters“ und „Survey items“.

Die Liste der „Objectives“ kann Zielvorgaben enthalten zur Sicherheit der Nutzer, zum Schutz des Gebäudes und ggf. zum Denkmalschutz, zum Umweltschutz oder zur Fortführung der Arbeitsvorgänge. Verwendete „Strategies“ werden abgeleitet, um den Zielsetzungen der „Objectives“ zu entsprechen. Solche „Strategies“ können z. B. Maßnahmen zur Vermeidung der Brandentstehung, zur Unterteilung des Gebäudes in Brandabschnitte und Nutzungsbereiche (compartmentation), zur frühzeitigen Brandmeldung und Brandbekämpfung etc. sein. Mit diesen Angaben ist möglich, eine Matrix aus „Objectives“ versus „Strategies“ zu bilden, wie in Tabelle 10.3 gezeigt.

Tabelle 10.3 Matrix „Objectives“ versus „Strategies“ (Beispiel)

	Vermeidung der Brandentstehung	Brandabschnittsbildung	Brandbekämpfung
Schutz von Personen	2	1	2
Schutz des Gebäudes	2	3	4

Die Zahlenwerte der Matrix in Tabelle 10.3 stellen die Wertigkeiten der „Strategies“ dar, um festzulegen, wie die „Objectives“ erfüllt werden können. Für mathematische Berechnungen müssen die Werte der Matrix normalisiert werden.

Durch das Erstellen einer weiteren Matrix „Politics“ versus „Objectives“ kann durch Multiplikation mit der Matrix „Objectives“ versus „Strategies“ ein neuer Vektor gefunden werden, der eine Verknüpfung der Ebenen von „Strategies“ versus „Politics“ herstellt.

Im nächsten Schritt sind „Parameter“ hinsichtlich der brandschutztechnischen Beurteilung des Gebäudes festzulegen, z. B. die Parameter Gebäudekonstruktion, Einteilung des Gebäudes in Räume und Abschnitte, Höhe, Gebäudenutzung, Möblierung, Ausstattung, spezielle Gefahren, Branderkennung, Meldung zur Feuerwehr, Rauchabzug, Maßnahmen zur Brandbekämpfung, Feuerwehr, Rettungswege, Personal und Management. Es wird eine Matrix mit „Strategies“ versus „Parameters“ gebildet. Durch Multiplikation mit der bereits ermittelten Matrix „Strategies“ versus „Politics“ kann ein Zusammenhang in Form einer Matrix „Politics“ versus „Parameters“ hergestellt werden, die eine Zuordnung jedes Parameters zur Umsetzung des erforderlichen Sicherheitsniveaus im Gebäude zulässt. Damit können bei

Variation einzelner brandschutztechnisch relevanter Parameter die Auswirkungen in einem veränderten Risk-Index dargestellt werden. Das Verfahren der Matrix-Berechnung wird in Bild 10.1 gezeigt.

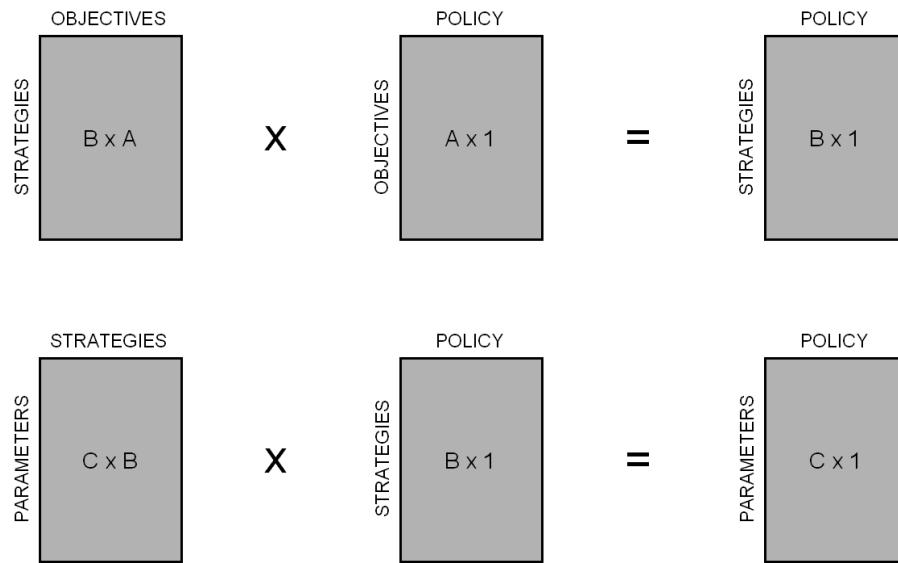


Bild 10.1 Schematische Verknüpfung der unterschiedlichen hierarchischen Ebenen [10.14]

10.2.3 Ermittlung von Wertigkeiten

Der Nutzer von Index-Methoden muss nicht die Grundlagen der Brandentstehung und Brandausbreitung sowie der Risikoanalyse im Detail kennen. Bei vielen Index-Methoden wurden die erforderlichen Verknüpfungen zwischen den einzelnen hierarchischen Ebenen nach dem Delphi Verfahren ermittelt [10.16] und stehen dem Anwender für bestimmte Bauwerke zur Verfügung. Nach dem Delphi Verfahren werden in einem vorgegebenen Gruppenkommunikationsprozess von Experten Daten für die Wertigkeiten einzelner Größen vorgeschlagen und anschließend als Mittelwerte festgelegt, die es dem Einzelnen ermöglichen, sich in einem definierten Anwendungsbereich mit einem komplexen Problem zu beschäftigen. Dabei entwirft ein kleines Überwachungsteam einen Fragebogen, der an eine größere Expertengruppe geschickt wird. Nach Rückgabe des Fragebogens fasst das Überwachungsteam die Ergebnisse zusammen und entwirft, basierend auf den Ergebnissen einen neuen Fragebogen für die Expertengruppe, um in einem zweiten Durchgang die Möglichkeit einer Korrektur der ursprünglichen Antworten zu testen.

Die Vorgehensweise nach dem Delphi Verfahren dient dazu, allen „Objectives“, „Strategies“, „Parameters“ eine Wertigkeit zuzuordnen. Damit ist es möglich, die erforderlichen Matrizen mit den für das Gebäude passenden Wertigkeiten hinsichtlich der brandschutztechnischen Bewertung auszufüllen. Aufgrund der Matrix-Multiplikation mit den Wertigkeiten, kann eine Wichtung für jeden Parameter festgelegt werden, die es zulässt, einen einzelnen Risk-Index für jedes Gebäude zu bestimmen. Dieser einzelne Wert des Risk-Index kann dann für Vergleiche mit ähnlichen Gebäuden verwendet werden.

10.2.4 Fiktives Anwendungsbeispiel

Die nachfolgend in verkürzter Form dargestellte Index-Methode wurde für ein mehrgeschossiges Wohngebäude in Holzbauweise entwickelt [10.11].

Die „Policies“ sollen ein akzeptables Sicherheitsniveau im Gebäude sicherstellen.

In dem vorliegenden Beispiel wird lediglich das „Objective“ Sicherstellung der Flucht und Rettung untersucht. In der Praxis kann als weiteres „Objective“ z. B. die Gewährleistung wirksamer Löscharbeiten oder auch der Schutz des Eigentums berücksichtigt werden.

Das Ziel der sicheren Flucht und Rettung aus dem Gebäude wird durch folgende „Strategies“ erreicht:

1. Beeinflussung der Brandentwicklung

Die Brandentwicklung wird durch lokale Brandbekämpfungssysteme, Rauchableitung und den Einsatz der Feuerwehr beherrscht.

2. Begrenzung der Brandausbreitung durch die Bauweise

Dies wird durch die Standfestigkeit des Gebäudes und der Abtrennungen im Gebäude sowie die Verwendung sicherer (nicht brennbarerer) Materialien erreicht.

3. Schaffung sicherer Rettungsmöglichkeiten

Dies wird durch die sichere Benutzbarkeit für die Nutzer und die Feuerwehr bei Rettungsarbeiten, Brandbekämpfung, Retten wertvoller Gegenstände etc. erreicht.

Anschließend werden die Wertigkeiten der „Strategies“ in der Matrix festgelegt, um die Anforderungen der „Objectives“ zu erfüllen (Tabelle 10.4). In der letzten Spalte sind die Werte normalisiert worden.

Tabelle 10.4 Matrix „Objectives“ versus „Strategies“

„Strategies“	Sichere Flucht und Rettung	normalisiert
Beeinflussung der Brandentwicklung	2	$2 / (2 + 2 + 4) = 0,25$
Begrenzung der Brandausbreitung durch die Bauweise	2	0,25
Schaffung sicherer Rettungsmöglichkeiten	4	0,5

Für das vorliegende Beispiel wurden folgende fünf „Parameter“ für die Einhaltung der „Strategies“ ausgewählt und die Wertigkeiten der „Parameter“ bezogen auf die „Strategies“ in Tabelle 10.5 mit Werten zwischen 0 und 5 angegeben:

1. Löschsysteme
2. Brandmeldeanlagen

3. Rauchableitung
4. Teilung des Gebäudes in Abschnitte
5. Personal / Feuerwehr

Tabelle 10.5 Matrix „Strategies“ versus „Parameters“

„Parameter“	Schaffung sicherer Rettungsmöglichkeiten	Begrenzung der Brandausbreitung durch die Bauweise	Beeinflussung der Brandentwicklung
Löschsysteme	5 (0,36)	5 (0,31)	4 (0,27)
Brandmeldeanlagen	3 (0,21)	3 (0,19)	3 (0,20)
Rauchableitung	2 (0,15)	3 (0,19)	4 (0,27)
Unterteilung des Gebäudes in Abschnitte	1 (0,07)	2 (0,12)	3 (0,20)
Personal / Feuerwehr	3 (0,21)	3 (0,19)	1 (0,06)

Jeder „Parameter“ ist in „Sub-Parameter“ unterteilt, um eine Zuordnung unterschiedlicher Wertigkeiten zwischen 0 und 5 zu ermöglichen. Im Folgenden wird ein Beispiel des „Parameters“ für zwei unterschiedliche Löschsysteme angegeben (Tabellen 10.6 bis 10.8):

- Automatische Sprinklersysteme und
- Handfeuerlöscher

Tabelle 10.6 Automatisch wirkendes Sprinklersystem

Erfassungseinheit	Entscheidungsregel						
Typ des Sprinklers	N	R	R	R	O	O	O
Ort des Sprinklers	-	A	E	B	A	E	B
Wertigkeit	N	M	L	H	M	L	H

Typ des Sprinklers: N = kein Sprinkler, R = Sprinkler in der Wohnung, O = normaler Sprinkler

Ort der Sprinkler: A = im Apartment, E = im Fluchtweg (Flur), B = im Apartment und im Fluchtweg (Flur)

Wertigkeit: N = keine, L = geringe, M = mittel, H = hohe

Tabelle 10.7 Tragbare Handfeuerlöscher

N	keine
F	Löscheinrichtungen in jedem Flur
A	Löscheinrichtungen in jedem Apartment

Tabelle 10.8 Wertigkeit der „Parameter“

„Sub-Parameter“	Entscheidungsregel											
automatisches Sprinklersystem	N	N	N	L	L	L	M	M	M	H	H	H
Handfeuerlöscher	N	F	A	N	F	A	N	F	A	N	F	A
Wertigkeit	0	0	1	1	1	2	4	4	4	5	5	5

Wertigkeit: Minimum = 0 und Maximum = 5

Nach dem in Bild 10.1 illustrierten Berechnungsgang der Bewertung muss zur Ermittlung des Risk-Index abschließend die Wichtung der „Parameters“ versus „Policies“ bestimmt werden (Tabelle 10.9).

Nach Tabelle 10.2 wurden folgende Entscheidungsebenen berücksichtigt: „Objectives“, „Strategies“ und „Parameters“. Im vorliegenden Beispiel wurden drei „Strategies“ und fünf „Parameters“ angewendet. Der Risiko-Index wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$R = \sum_{i=1}^n w_i \cdot g_i \quad (10.1)$$

Dabei bedeuten:

w_i Wichtung der „Parameter“ nach Tabelle 10.9,

g_i Wertigkeit der „Parameter“, die aus den Tabellen für die „Sub-Parameter“ abgeleitet wird (Tabellen 10.6 bis 10.8),

n Anzahl der „Parameter“.

Tabelle 10.9 Matrix „Parameters“ versus „Policies“

(gilt für das „Objective“ Sicherstellung der Flucht und Rettung von Personen)

„Parameter“	Wichtungen zum Erfüllen der „Policies“
Löschanlagen	$0,5 \times 0,36 + 0,25 \times 0,31 + 0,25 \times 0,27 = 0,325$
Brandmeldeanlagen	$0,5 \times 0,21 + 0,25 \times 0,19 + 0,25 \times 0,20 = 0,203$
Rauchableitung	$0,5 \times 0,15 + 0,25 \times 0,19 + 0,25 \times 0,27 = 0,190$
Teilung des Gebäudes in Abschnitte	$0,5 \times 0,07 + 0,25 \times 0,12 + 0,25 \times 0,20 = 0,115$
Personal / Feuerwehr	$0,5 \times 0,21 + 0,25 \times 0,19 + 0,25 \times 0,06 = 0,167$

10.3 Quantitative Risikomethoden

10.3.1 Einführung

Mit quantitativen Risikomodellen können Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten einzelner Ereignisse in Gebäuden erfasst werden. Es gibt verschiedene Modelle (Tabelle 10.10), die sich in ihren Lösungsansätzen unterscheiden und der Stufe 2 oder der Stufe 3 zugeordnet

werden können. Für eine Bewertung entsprechend Stufe 2 kann die Ereignisbaumanalyse, die im angelsächsischen Bereich auch als Event-Tree-Analysis (ETA) bezeichnet wird, als probabilistisches Verfahren verwendet werden.

Die Ereignisbaumanalyse (ETA) kann als quantitative Methode für Planungsprozesse individuell eingesetzt werden. 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 mit 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 [10.17] (siehe Tabelle 10.10).

Tabelle 10.10 Anwendung quantitativer Risikomethoden

Methode	Verwendung	Entwickler
Computation of Risk Indices by Simulation Procedures (CRISP)	Schutz von Leben	National Research Council, Canada [10.18]
Fire Risk Evaluation and Cost Assessment Model (FiRECAM)	Bürogebäude	National Research Council, Canada [10.19]
Event Tree Analysis (ETA)	alle Gebäudearten	Verschiedene [10.20, 10.21]
Fire Risk analysis with Reliability Index β	alle Gebäudearten Stufe 3	Verschiedene [10.22, 10.23]

10.3.2 Ereignisbaumanalyse

Das Verfahren der Ereignisbaumanalyse kann in sechs Schritte gegliedert werden:

- Festlegungen zum Start des Feuers,
- Angaben zu den Sicherheitseinrichtungen und -funktionen (sowohl in technischer als auch menschlicher Hinsicht),

- Aufbau des Ereignisbaums,
- Einstufung der Resultate,
- Erfassen der bedingten Wahrscheinlichkeit von jedem Ast des Ereignisbaums,
- Quantifizierung der Ergebnisse.

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 auch 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. Bild 10.2 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. Das Risiko eines jeden Szenarios wird berechnet, indem die Wahrscheinlichkeit eines speziellen Ereignisses, hier des Brandausbruchs, mit den Wahrscheinlichkeiten der folgenden Ereignisse (Funktion oder Ausfall) auf diesem betreffenden Ast des Ereignisbaums multipliziert wird. Das Risiko ergibt sich dann aus der Summe den Einzelrisiken (Eintrittswahrscheinlichkeit x Schadenspotenzial) aller Szenarien des Ereignisbaums.

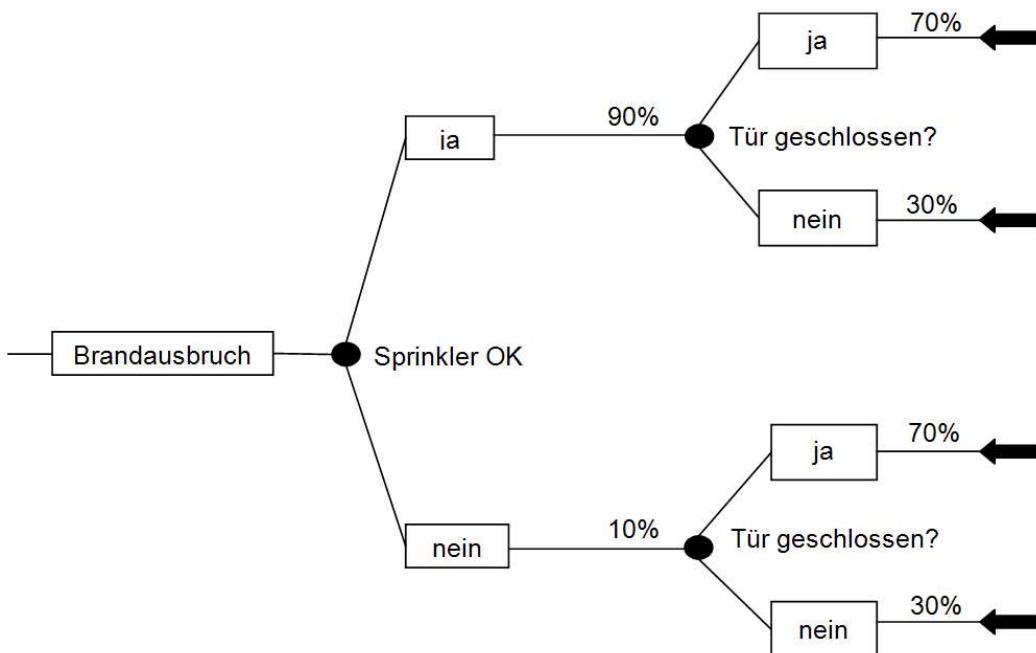


Bild 10.2 Beispiel eines Teils eines einfachen Ereignisbaums

Als mögliche Ergebnisse einer Ereignisbaumanalyse kann ein individuelles Risiko oder ein durchschnittliches Risiko bestimmt werden, ebenso können Feststellungen zum Grad einer Risikogefährdung in Teilbereichen oder im Extremfall die maximalen Konsequenzen für das ganze Gebäude ermittelt werden. Für eine Gesamtbeurteilung des Risikos mittels eines Ereignisbaums sind sowohl erfolgreiche als auch erfolglose Aktionen der Brandschutzmaßnahmen im Gebäude mit Wahrscheinlichkeiten zu bewerten.

Um Maßnahmen zu erkennen, die einen großen Einfluss auf die Sicherheit der Personen oder der Gebäudekonstruktion haben können, sind unterschiedliche Kombinationen des Brandausbruchs im Gebäude (Bereich, Raum, Abtrennungen zum Rest des Gebäudes, Brandquelle) und der Randbedingungen für den Brandverlauf (Brandentwicklung, Brandausbreitung) zu betrachten. Die Brandentwicklung ist abhängig von der Heftigkeit des Brandes, der Raumhöhe, der Wärmefreisetzungsraten, der Ventilation des Brandraumes, Maßnahmen zur Rauch- und Wärmeableitung etc.. Aus den Ergebnissen der rechnerischen Analyse ergeben sich z. B. als gefährliche Randbedingungen für die Flucht und Rettung von Personen der Verlust der Sichtweite sowie die Einwirkung toxischer Rauchgaskomponenten und Hitze. Diese Randbedingungen sind mit Beurteilungswerten für die Sicherheit von Personen zu vergleichen, wie sie in Kapitel 8 angegeben und begründet sind. Der Räumungsprozess hängt von den Zeiten bis zur Entdeckung eines Brandes, der Reaktionszeit und der Fluchtzeit der Personen ab (Kapitel 9).

Je nach Komplexität und Größe des zu untersuchenden Gebäudes können folgende Ereignisse mit Fallunterscheidungen im Ereignisbaum betrachtet werden:

- Ausgangspunkt des Brandes, Bereich
 - ohne Brandschutzmaßnahmen
 - mit Brandmeldeanlage
 - mit automatischer Löschanlage
- 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)

10.3.3 Durchführung einer quantitativen Risikoanalyse

Für die Durchführung einer quantitativen Brandrisikoanalyse muss die Ausgangssituation bekannt sein. Sofern ein bestehendes Gebäude bewertet werden soll, muss durch eine Begutachtung der Istzustand erfasst und mit den Unterlagen verglichen werden. Vorhandene Baumängel sind zu identifizieren und sofern erforderlich kurzfristig zu beheben. Anschließend erfolgt eine Beurteilung hinsichtlich einer Ertüchtigung des Brandschutzes, wobei das Brandsicherheitsniveau (vgl. Kapitel 3), die Brandszenarien und die Bemessungsbrände (vgl. Kapitel 4) festgelegt werden müssen.

Die quantitative Risikoanalyse wird in sechs Schritte unterteilt:

- Wahl der Ereignisse (Szenarien),
- Herleitung eines Ereignisbaums,
- Quantifizierung der Brandentwicklung und Brandwirkungen,
- Beurteilung des Schadens,
- Berechnung des Grades des Risikos,
- Risikobewertung.

Die zu untersuchenden Ereignisse hängen davon ab, ob sich eine Analyse auf den Personenschutz bezieht oder auf den Gebäudeschutz abhebt. In einer Personenschutzzanalyse spielen der Brandverlauf und auch die Möglichkeiten zur Flucht eine Rolle. Daher sind die Brandentwicklungs- und Ausbreitungsphase des Brandes sowie die Verfügbarkeit von Ausgängen von größerem Interesse als der vollentwickelte Brand und die Unversehrtheit der Brandabschnitte.

Es wird grundsätzlich unterstellt, dass ein Brand entsteht und sich entwickelt. Ereignisse wie Brandbeginn und Selbstverlöschen des Brandes werden nicht betrachtet. Folgende Ereignisse können untersucht werden:

Sich entwickelnder Brand → Brandort → Tageszeit → Branderkennung → Löschung durch Personal → Sprinkler kontrollieren den Brand → Feuerwehr kontrolliert den Brand → Abtrennung begrenzt die Brandausbreitung.

Um korrekte Daten über die Eintrittswahrscheinlichkeit der Ereignisse zu erhalten, kann der Anwender ggf. auf Datenbanken zurückgreifen oder sich auf Literaturangaben, Erfahrungswerte und sein eigenes technisches Urteil stützen.

Abhängig von den zu beachtenden Ereignissen (Aktionen oder Maßnahmen) ergeben sich unterschiedliche Szenarien als Äste der Ereignisbaums. Die Ereignisse müssen in der Reihenfolge berücksichtigt werden, wie sie sich physikalisch nach Brandbeginn auswirken. Der Anwender muss sicherstellen, dass er keine Fälle modelliert, die in Wirklichkeit nicht vorkommen können.

In der Risikoanalyse werden nun die einzelnen Pfade des Ereignisbaums, deren Grundlage unterschiedliche Brandschutzalternativen (Ereignisse) sind, berechnet. Dabei ergeben sich aufgrund der vorgegebenen Erfolgs- oder Ausfallwahrscheinlichkeiten für die gewählten Ereignisse bedingte Wahrscheinlichkeiten für das jeweilige Szenario.

Die Brandentwicklung und Brandausbreitung wird mit Hilfe geeigneter Berechnungsverfahren (vgl. Kapitel 5) ermittelt. Dies können einfachere Rechenverfahren wie Handgleichungen oder Computersimulationen mit Zonenmodellen oder CFD-Modellen sein. Die Wahl des Verfahrens hängt von der Komplexität des zu untersuchenden Gebäudes und den Zielsetzungen der Analyse ab.

Die Untersuchungen der Brandentwicklung mit Modellen sollen Informationen liefern, wie sich brandbezogene Parameter im Laufe der Branddauer verändern. Solche Parameter können Rauchschichthöhe, Temperaturen der Rauchgasschicht und der unteren Luftsicht, Sichtweite, Strahlungsdichte, Konzentrationen von Ruß und toxischen Gasen und die Rauchausbreitung im Gebäude sein. Aus den Zielsetzungen der Risikoanalyse ergibt sich, welche dieser Parameter näher untersucht werden sollten. Bei der Auswahl der angemessenen, ingenieurmäßigen Verfahren und der korrekten Nutzung der Verfahren ist die Kompetenz und Erfahrung des Anwenders von Bedeutung.

Die Ereignisse hinsichtlich der Flucht und Rettung und des Gebäudeschadens werden für alle Brandszenarien im Ereignisbaum festgelegt. Sollte sich bei den Berechnungen zeigen, dass die ermittelte Zeitdauer bis zum Erreichen von Grenzwerten für Personen auf der Flucht kürzer ist als die erforderliche Fluchtzeit aus dem Gebäude oder die Zeit für eine Brandunterdrückung durch Anlagentechnik, sind entsprechende Maßnahmen vorzusehen.

Schäden können auftreten, wenn die Temperatur z. B. 300 °C übersteigt. Aus dem Ereignisbaum kann abgelesen werden, welche Maßnahmen erforderlich sind, damit nicht das ganze Gebäude von einem Brand erfasst wird. In der Regel verhindern Ereignisse wie

- der Brand wird vom Personal gelöscht,
- der Brand wird von Sprinklern unterdrückt oder
- der Brand wird von der Feuerwehr kontrolliert,

dass ein Totalschaden im Gebäude eintritt.

Wenn die zeitliche Brandentwicklung und der Brandschaden als verbrannte Fläche ermittelt und die Abhängigkeiten für alle Szenarien im Ereignisbaum festgehalten worden sind, ist es möglich, eine Maßzahl für das Risiko abzuleiten. Die am häufigsten verwendeten Aussagen für eine Risikobewertung sind

- Schadenswahrscheinlichkeit,
- Durchschnittsrisiko,
- Risikoprofile und
- maximale Konsequenz.

Die *Schadenswahrscheinlichkeit* bestimmt sich aus der Addition aller ermittelten Wahrscheinlichkeiten, mit denen ein Schaden im Gebäude aufgetreten ist, weil unmittelbare Löschmaßnahmen der Nutzer erfolglos waren.

Das *Durchschnittsrisiko* R_{avg} ermittelt sich aus der Summe von Wahrscheinlichkeit p_i multipliziert mit Schadensausmaß c_i als zerstörte Fläche für jedes im Ereignisbaum dargestellte Einzelszenario i.

$$R_{avg} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot c_i \quad (10.2)$$

Als Ergebnis wird eine mittlere Fläche ermittelt, die von dem Brand erfasst wird.

Für die Erstellung eines *Risikoprofils* werden die Szenarien in Abhängigkeit von der zerstörten Fläche abfallend sortiert. Dann werden die Wahrscheinlichkeiten gleichen Schadensausmaßes zu einer kumulativen Wahrscheinlichkeit addiert. Die Kehrwerte der kumulativen Schadenswahrscheinlichkeiten werden über der zerstörten Fläche aufgetragen und ergeben so das Risikoprofil [10.21]. Aus dem Risikoprofil kann auch die Wahrscheinlichkeit abgeleitet werden, mit der ein Totalschaden als *maximale Konsequenz* eines Brandes in dem untersuchten Gebäude zu erwarten ist.

In der Risikoanalyse sind viele Einflussgrößen als stochastische Variable zu betrachten, z. B. Brandlast und Brandwachstum. Der Anwender sollte im Rahmen einer Empfindlichkeitsanalyse untersuchen, wie sich Ungewissheiten auf das Gesamtergebnis auswirken, z. B.:

- Variation der Eingangsdaten,
- Vereinfachungen in Modellen,
- Zuverlässigkeit technischer Anlagen,
- Einfluss offener Türen, ungeeigneter Maßnahmen etc..

Bei der Ereignisbaumanalyse kann die Empfindlichkeit einzelner Parameter direkt durch Einführen entsprechender Ereignisse mit bewertet werden, z. B. geschlossene oder offene Tür, blockierter Fluchtweg, Versagen der Brandmeldeanlage bzw. der Sprinkleranlage. Der Anwender des Verfahrens sollte darauf achten, dass er im Ereignisbaum alle relevanten Fälle erfasst.

In einer abschließenden Bewertung der getroffenen Schutzmaßnahmen werden die mit ingenieurmäßigen Verfahren ermittelten Brandwirkungen und / oder Schäden mit den hierzu festgelegten Grenzwerte einhalten. Ansonsten werden zusätzliche Maßnahmen zur Ertüchtigung im Gebäude benötigt. Durch Vergleich unterschiedlicher Alternativen können optimale Lösungen gefunden werden, die den besten Schutz für die Nutzer und den Erhalt des Gebäudes mit vertretbarem Aufwand bieten. Andererseits können einzelne Szenarien im Ereignisbaum oder Ereignisse in diesen Szenarien ausgesondert werden, weil sie keinen Risikobeitrag liefern und daher weder eine Gefahr darstellen noch einen Sicherheitsgewinn bringen.

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 [10.24] entwickelt. Es ist für

- unterschiedliche Bauweisen (Beton, Stahl, Verbund, Holz, Mauerwerk),
- unterschiedliche Nutzungsarten (normale Gebäude und Sonderbauten),
- unterschiedliche Brandeinwirkungen (Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung),
- unterschiedliche rechnerische Nachweisverfahren (vereinfachte und allgemeine Rechenverfahren 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,
- Produktionsraten von Rauch,
- Entstehungsraten von 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 EN 1990 – Eurocode [10.25] geregelt sind. Weiterhin sind die mechanischen Einwirkungen auf Gebäude in den verschiedenen Teilen von EN 1991-1 genormt.

Für den Brandfall wird in 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 Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) und eine bauordnungsrechtlich geforderte, auf der sicheren Seite liegende Feuerwiderstandsdauer zu definieren.

Je nach verwendetem Naturbrandmodell und Nachweisverfahren sind unterschiedliche Eingangsgrößen 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 Brandausfläche und/oder Abbrandrate, die in der stationären Phase eines *brandlastgesteuerten Brandes* die maximale Wärmefreisetzungsraten und Temperaturrentwicklung bestimmen,
- die Ventilationsbedingungen, die im *ventilationsgesteuerten Brand* für die maximale Wärmefreisetzungsraten und Temperaturrentwicklung 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:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad (10.3)$$

mit

- p_1 jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der Nutzungseinheit,
- p_2 Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Nutzer und 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 Brandentstehungshäufigkeit 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 [m^2],
- λ_1 mittlere Auftretensrate von Entstehungsbränden je Quadratmeter Grundfläche und Jahr [$1/(m^2 \cdot a)$],
- a Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter und Jahr [$1/(m^2 \cdot a)$],
- 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 10.11 entnommen werden. Die Angaben für verschiedene Nutzungen wurden in [10.24] aufgrund einer Auswertung verschiedener internationaler Quellen, insbesondere [10.26], [10.27], zusammengetragen.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_2 der Brandbekämpfung berücksichtigt sowohl die Erstbekämpfung des Entstehungsbrandes durch die Nutzer als auch die Löschaßnahmen der alarmierten Feuerwehr. Aufgrund internationaler Erfahrungswerte und eigener statistischer Untersuchungen kann pauschal mit $p_2 = 0,1$ gerechnet werden. Nach englischen Brandstatistiken werden durchschnittlich 3 von 4 Entstehungsbränden durch die Nutzer gelöscht [10.32], so dass 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, so dass die Ausfallwahrscheinlichkeit p_2 geringer anzusetzen ist.

Tabelle 10.11 Mittlere jährliche Auftretensrate von Bränden λ_1 je Quadratmeter Geschossfläche bzw. Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 je Nutzungseinheit für verschiedene Nutzungen (nach [10.26], [10.27])

Nutzung	Mittlere Auf-tretensrate je m^2 und Jahr	Auftretenswahrscheinlichkeit je Nutzungseinheit und Jahr		
		$p_1 = a \cdot A^b$	p_1	
	λ_1 [$1/(m^2 \cdot a)$]	$a [1/(m^2 \cdot a)]$	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 1,0	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

Zahlenwerte p_2 für die Brandbekämpfung durch eine öffentliche Feuerwehr bzw. eine Werkfeuerwehr werden in Tabelle 10.12 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.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_3 einer automatischen Löschanlage hängt vom Auslegungsstandard ab. Empfohlene Zahlenwerte p_3 für verschiedene Löschanlagen können ebenfalls der Tabelle 10.12 entnommen werden.

Als VdS-Standard für flächendeckende Sprinkleranlagen gem. Tabelle 10.12. 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 Sachverständigen.

Gleiches gilt für Gaslöschanlagen nach VdS-Standard gem. den VdS-Planungs- und Einbaurichtlinien für Gaslöschanlagen (VdS 2093, VdS 2380, VdS 2381).

Tabelle 10.12 Ausfallwahrscheinlichkeit p_2 bzw. p_3 von Brandbekämpfungsmaßnahmen

Brandbekämpfung durch	Ausfallwahrscheinlichkeit	
	p_2	p_3
öffentliche Feuerwehr mit Hilfsfrist < 15 min	0,2	
> 20 min	0,5	
Werkfeuerwehr mit Hilfsfrist ¹⁾ < 10 min (vier Staffeln)	0,02	
< 10 min (zwei Staffeln)	0,05	
Automatische Löschanlage Sprinkleranlage nach VdS/CEA-Standard ²⁾		0,02
in anderen Fällen		0,05
Sonstige Wasserlöschanlage		0,1
Gaslöschanlage		0,1

¹⁾ automatische Brandmeldung und Alarmierung werden vorausgesetzt

²⁾ Planung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung nach den anerkannten Regeln der Technik

Die Löschaßnahmen der Feuerwehr und die Brandbekämpfung durch eine Löschanlage sind näherungsweise voneinander unabhängig, sodass sowohl p_2 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, so dass ohne genauere Analyse konservativ $p_2 = 1,0$ anzunehmen ist.

10.4.3 Erforderliche Zuverlässigkeit im Brandfall

Im Informativen Anhang B von EN 1990 [10.25] werden die verschiedenen baulichen Anlagen in Schadensfolgeklassen CC eingestuft, denen über Zuverlässigkeitssklassen 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 10.13 sind die Schadensfolgen sowie die Werte β und p_f für Grenzzustände der Tragfähigkeit und einen Bezugszeitraum von 1 Jahr zusammengestellt. Dabei gilt mit $\Phi()$ als Funktion der Standard-Normalverteilung

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (10.6)$$

Aus der für alle Lastfälle geltenden Versagenswahrscheinlichkeit p_f und der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem Schadenfeuer in der betreffenden Nut-

zungseinheit nach Gl. (10.3) kann eine bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ im Brandfall bzw. der damit verknüpfte Zuverlässigkeitsexponent 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.

Tabelle 10.13 Einstufung baulicher Anlagen in Schadensfolgen und Zuordnung von Zuverlässigkeitssklassen nach EN 1990 [10.25], Anhang B

Schadensfolgeklassen CC Zuverlässigkeitssklassen RC	Merkmale	Beispiele im Hochbau
CC3 RC3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen $\beta = 5,2$ $p_f = 1,0 \text{ E-7 (1/a)}$	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC2 RC2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen $\beta = 4,7$ $p_f = 1,3 \text{ E-6 (1/a)}$	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 $\beta = 4,2$ $p_f = 1,3 \text{ E-5 (1/a)}$	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr, (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

Zur Einschätzung von möglichen wirtschaftlichen und umweltbeeinträchtigenden Schadensfolgen, die gemäß der Tabelle 10.13 die Basis für die Zuordnung von Zuverlässigkeitssklassen nach 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 Unternehmensaktivitäten abhängenden wirtschaftlichen Folgen nicht sachgerecht.

10.4.4 Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandeinwirkung

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 Eurocode 1 Teil 1-2, Anhang E [10.1] sind durchschnittliche Brandlastdichten (mittlere Brandlasten pro m^2 Geschossfläche) für typische Nutzungen angegeben. Hierauf basieren die in Tabelle 10.14 zusammengestellten Mittelwerte und Standardabweichungen. Als charakteristischer Wert wird das 90 %-Quantil empfohlen, das in Anlehnung an [10.1] unter der Voraussetzung einer Gumbel-Verteilung mit einem Variationskoeffizienten von 0,3 berechnet wurde.

Tabelle 10.14 Brandlastdichten [MJ/m^2] 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
Industrie – Lager	1180	*)	2240
Industrie – Produktion	300	*)	590

*) Die Brandlastdichten in Industriegebäuden streuen stark. Die angegebenen Werte dienen als Anhalt; sie können eine genauere Ermittlung in der Regel nicht ersetzen.

Die Brandlastdichten in Tabelle 10.14 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 Brandlasten nach Tabelle 6 zu addieren.

Zur Ermittlung des Zeitverlaufs der Raumtemperatur mit einem Naturbrandmodell wird unter Vorgabe eines Bemessungsbrandszenarios ein resultierender Verlauf der Wärmefreisetzungsraten ermittelt, der einen großen Teil der Einflussgrößen beinhaltet.

In [10.24] wurden umfangreiche Zuverlässigkeitssanalysen 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 Brandverlaufs die Zuverlässigkeit bei realistischer Naturbrandbeanspruchung unter Berücksichtigung streuernder 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 Wärmefreisetzungsr率e 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 10.13 im Mittel eingehalten und gemäß [10.24] um höchstens $\pm\Delta\beta_{fi} = 0,5$ unter- oder überschritten wird.

Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi,q}$ für die Brandlastdichte ist in Bild 10.3 als durchgezogene Kurve in Abhängigkeit vom erforderlichen Zuverlässigkeitsexponenten β_{fi} dargestellt.

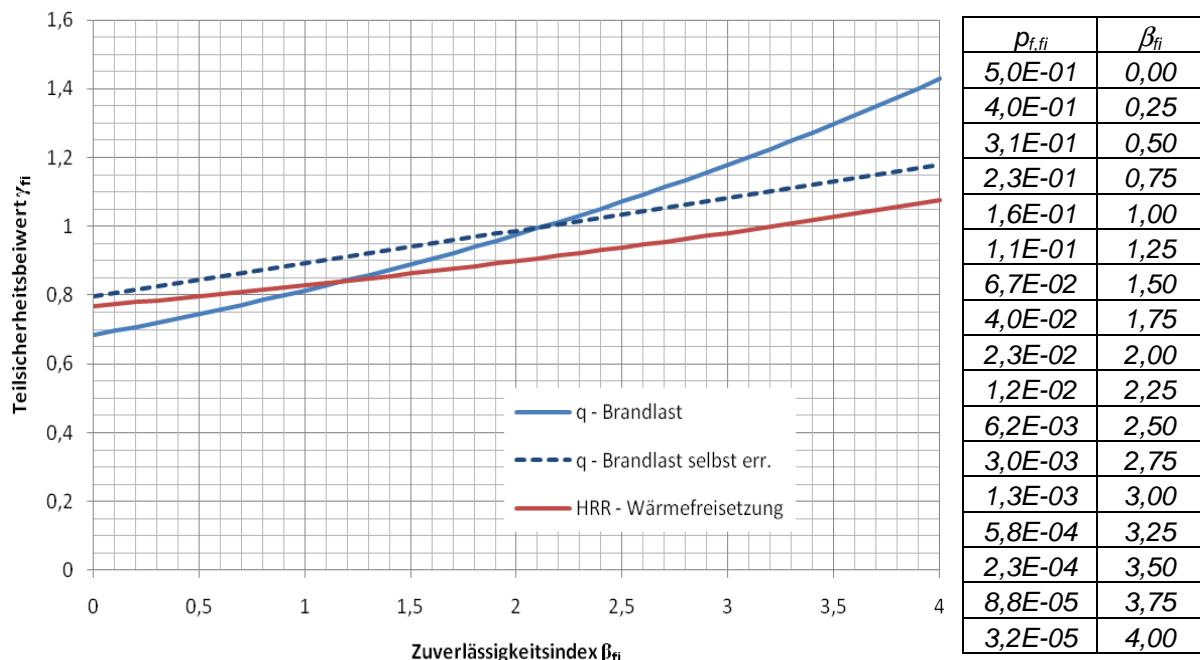


Bild 10.3 Teilsicherheitsbeiwerte für die maßgebenden Einflussgrößen eines Naturbrandes bezogen auf die definierten charakteristischen Werte in Abhängigkeit von dem Zuverlässigkeitsexponenten bzw. der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall

Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi,HRR}$ für die maximale Wärmefreisetzungsr率e \dot{Q}_{max} ($\equiv HRR$) ist in Bild 10.3 als gestrichelte Kurve dargestellt.

Sowohl für die Brandlastdichte als auch für die Wärmefreisetzungsr率e wird in der Regel eine Gumbel-Verteilung vorausgesetzt. Dann können die Teilsicherheitsbeiwerte mit Gl. (10.9) als Quotient aus Bemessungswert im Brandfall und 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.

Für die Brandlastdichte wird der Variationskoeffizient mit $V = 0,3$ und der Sensitivitätsfaktor für die Ermittlung des Bemessungswertes mit $\alpha = 0,6$ angenommen. Für die Wärmefreisetzungsr率e betrigt der Variationskoeffizient $V = 0,2$ und der Sensitivitätsfaktor $\alpha = 0,5$. Vereinfachend darf der Teilsicherheitsbeiwert für die Wärmefreisetzungsr率e unabhängig von β_{fi} mit $\gamma_{fi,HRR} \approx 1,0$ angenommen werden.

Wird die Brandlastdichte im Einzelfall ermittelt (wie z. B. im Industriebau üblich), sind die zufälligen Streuungen kleiner. Dann kann der Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} mit Gl. (10.10) berechnet werden unter Annahme einer Normalverteilung mit dem Variationskoeffizienten $V = 0,2$ und dem Sensitivitätsfaktor $\alpha = 0,6$. Dieser Teilsicherheitsbeiwert kann ebenfalls aus Bild 10.3 (strichpunktierte Kurve) abgelesen werden.

$$\gamma_{fi,q} = \frac{1 + \alpha \cdot \beta_{fi} \cdot V}{1 + 1,282 \cdot V} \quad (10.10)$$

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 brandschutztechnischen 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 10.4 dargestellt. Den einzelnen Ereignispfaden des Ereignisbaums lassen sich verschiedene Brandverläufe a bis f entsprechend Bild 10.5 zuzuordnen, die durch den zeitlichen Verlauf der Wärme freisetzungsr率e beschrieben werden. Diese Brandverläufe werden in den Grenzzustands-

gleichungen für den Nachweis der Bauteile berücksichtigt, die im Rahmen einer Systemzuverlässigkeitssanalyse miteinander verknüpft werden.

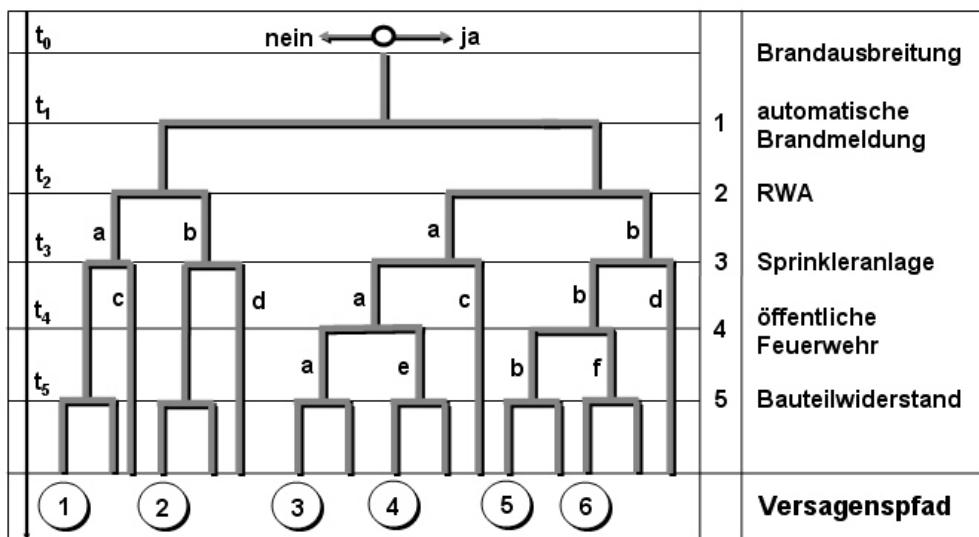


Bild 10.4 Ereignisbaum zur Ermittlung möglicher Versagenspfade (nach [10.3])

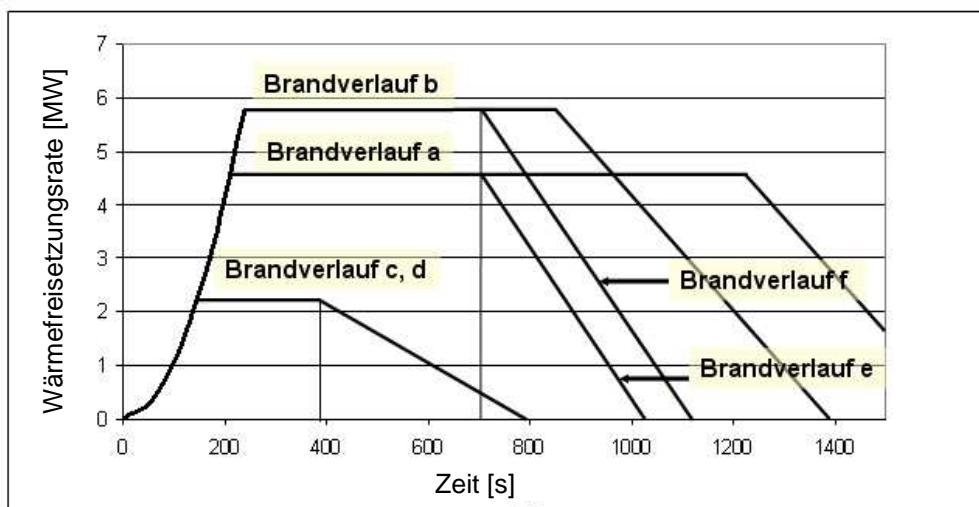


Bild 10.5 Brandverläufe (qualitativ) in Abhängigkeit von Funktion und Ausfall der anlagen-technischen und abwehrenden Komponenten

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 Systemzuverlässigkeitssanalyse in der Regel im Zeitschrittverfahren durchgeführt werden. Sie ist daher sehr aufwendig und für praktische Anwendungen wenig geeignet. In [10.24] wurden solche Analysen durchgeführt, um Sicherheitsanforderungen für vereinfachte, praxisgerechte Nachweise abzuleiten bzw. zu kalibrieren.

10.5 Sicherheitskonzept für Nachweise der Entrauchung

Grundsätzlich lässt sich das in Kapitel 10.4 vorgestellte Sicherheitskonzept auch auf die Bemessung von Entrauchungsmaßnahmen bzw. den Nachweis einer raucharmen Schicht übertragen. Auch hierfür werden Bemessungswerte der streuenden Einflussgrößen der Brandeinwirkungen benötigt. Neben der Brandlastdichte und der Wärmefreisetzungsraten sind jedoch ggf. Produktionsraten von Ruß und Schadgasen im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung von Personen von Bedeutung.

Die erforderliche Zuverlässigkeit kann bei der Entrauchung im Brandfall im Vergleich zur brandschutztechnischen Bemessung der Konstruktion reduziert werden, da eine unmittelbare Gefahr für Leib und Leben in der Regel nicht besteht. Unter Abwägung zwischen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erscheint eine um 1 bis 2 Zehnerpotenzen höhere bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall akzeptabel. Genauere Untersuchungen hierzu und eine Kalibrierung an der bisherigen Praxis in Deutschland stehen noch aus.

10.6 Sicherheitskonzept für Nachweise der Räumung

Ganz analog lässt sich das Sicherheitskonzept auch auf Nachweise der Räumung von Gebäuden im Brandfall übertragen. Hierbei sind die Brandeinwirkungen maßgebend für die Ermittlung der für die Entfluchtung zur Verfügung stehenden Zeit, während die Anzahl und die Mobilität der Personen und die Abmessungen der Rettungswege die für die Entfluchtung erforderliche Zeit bestimmen.

Die Zeit $t_{\text{verfügbar}}$, innerhalb der die im Gebäude befindlichen Personen nicht durch Brandeinwirkungen geschädigt werden, kann gleichgesetzt werden mit der Zeitspanne, während der eine raucharme Schicht bestimmter Dicke aufrechterhalten bleibt und / oder während der ein ausreichender Feuerwiderstand der tragenden und ggf. den Rettungsweg abtrennenden Bauteile gegeben ist. Die erforderliche Zeit für die Entfluchtung $t_{\text{Räumung}}$ wird mit Hilfe von Ingenieurmethoden bestimmt (z. B. durch Personenstromsimulation).

Die Räumung ist erfolgreich, wenn der Bemessungswert der für die Entfluchtung erforderlichen Zeit nicht größer ist als die für die Entfluchtung zur Verfügung stehende Zeit:

$$t_{\text{Räumung,d}} \leq t_{\text{verfügbar,d}} \quad (10.11)$$

mit

$t_{\text{Räumung,d}}$ Bemessungswert der für die Entfluchtung erforderlichen Zeit

$t_{\text{verfügbar,d}}$ Bemessungswert der für die Entfluchtung zur Verfügung stehenden Zeit

Da $t_{\text{verfügbar,d}}$ primär von den Brandeinwirkungen abhängt und mit einem Brandmodell ermittelt wird, können für die Eingangsparameter der Brandeinwirkung grundsätzlich die gleichen Bemessungswerte verwendet werden wie für den Nachweis der Entrauchung. Der Bemessungswert $t_{\text{Räumung,d}}$ ergibt sich in Abhängigkeit von starker streuenden Einflussgrößen wie der Anzahl der Personen und der Zusammensetzung und Mobilität der Personengruppe. In

Personenstromanalysen werden dafür im Allgemeinen deterministische Werte verwendet, die ggf. konservativ gewählt oder in Empfindlichkeitsstudien variiert werden.

Probabilistische Zuverlässigkeitsanalysen für die Nachweisverfahren zur Räumung nach Kapitel 9 stehen noch aus. Sie müssen auch Aufschluss über die erforderliche Zuverlässigkeit geben, die wie bei der Entrauchung geringer sein wird als bei den Nachweisen der baulichen Brandschutzmaßnahmen.

10.7 Literatur

- [10.1] DIN EN 1991-1-2: Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke; Teil1-2: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkungen auf Tragwerke; September 2003
- [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.: The SFPE Handbook, 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://users.belgacombusiness.net/cd046514/webengels.html>
- [10.10] DE SMET: Is F.R.A.M.E Mathematically and Scientifically Reliable? <http://users.belgacombusiness.net/cd046514/framemaths.html>
- [10.11] 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.
- [10.12] 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.

- [10.13] KARLSSON, B.: Fire Risk Index Method-Multi Storey Apartment Buildings, FRIM-MAB, Version 1.2, Trätek Report I 0009025, Sweden, 2000.
- [10.14] WATTS, J. M. Jr.: Fire Risk Ranking; Section 5, Chapter 2, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, USA, 1995.
- [10.15] FRANTZICH, H.: Fire Safety Risk Analysis of a Hotel; Department of Fire Engineering, Lund University, Report 3091, Sweden, 1997.
- [10.16] LINSTONE; TUROFF: The Delphi Method – Techniques and Applications; Addison-Wesley Publishing Company, 1975.
- [10.17] NYSTEDT, F.; RANTANTALO, T.; MICHEELSEN, Ch.: Quantifying the Safety Level in the Danish Building Fire Regulations, National Agency for Enterprise and Construction, Copenhagen, 2000.
- [10.18] ISO/TC92/SC4/WG10 N24 Rev: Draft Material submitted describing Fire Risk Assessment Methods, 2001.
- [10.19] MEACHAM, B. J.: The SFPE Handbook, Fire Protection Engineering; section five, chapter 12, 3rd edition, 2002.
- [10.20] ISO/TC/SC4/WG10 N34 Rev1: Fire Safety Engineering, WG10: Fire Risk Assessment; Draft document on fire risk Assessment guidance, 09/2001.
- [10.21] 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.
- [10.22] 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.
- [10.23] 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.
- [10.24] 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.
- [10.25] EN 1990: Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung; April 2002.
- [10.26] 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.
- [10.27] 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.

ANHANG 1 BEZEICHNUNGEN UND SYMBOLE

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
α	Konstante	-	0,44
α	Vorfaktor des t^2 -Bemessungsbrandes	kW/s ²	entfällt
α	Wärmeübergangszahl	W/m ² K	entfällt
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_r	radiativer Anteil der Energiefreisetzungsraten	-	entfällt
ε_m	Emissionsgrad der Bauteiloberfläche	-	entfällt
ε_{res}	Ausnutzungsfaktor für Bauteile der Querschnittsklassen 1, 2 oder 3 nach EC 3 Teil 1-1 sowie Zugglieder	-	entfällt
ε_{res}	resultierender Emissionsgrad ($= \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m$)	-	entfällt
ε_f	Emissionsgrad des Brandraums	-	entfällt
γ	Sicherheitsbeiwert	-	entfällt
γ_{GA}	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen in Verbindung mit außergewöhnlichen Einwirkungen	-	entfällt
$\gamma_{n,c}, \gamma_{n,r}$	Faktor zur Berücksichtigung nationaler Brandversuche	-	entfällt
$\gamma_{M,fi}$	Teilsicherheitsbeiwert für Materialkennwerte bei Brandbeanspruchung	-	entfällt

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
γ_R, γ_S	Teilsicherheitsbeiwerte	-	entfällt
η_{fi}	Reduktionsfaktor für mechanische Einwirkungen im Brandfall (abhängig von Verhältnis $\xi = Q_{k,1}/G_k$)	-	entfällt
λ	Wärmeleitzahl bzw. Wärmleitfähigkeit	W/mK	entfällt
ν	kinematische Viskosität	m^2/s	entfällt
ρ	Dichte des Gasgemisches	kg/m ³	entfällt
ρ	Dichte bzw. Rohdichte	kg/m ³	entfällt
ρ_∞	Dichte der Umgebungsluft	kg/m ³	entfällt
ρ_∞	Gasdichte der Kaltgasschicht	kg/m ³	entfällt
ξ	Temperaturverhältnis Rauchgasschicht (T_s) zu Kaltgasschicht (T_∞)	-	entfällt
$\psi_{1,i}, \psi_{2,i}$	Kombinationsbeiwerte nach EC 1 Teil 1	-	entfällt
Φ	Abschattungsfaktor	-	entfällt
θ	Temperatur	°C od. K	entfällt
$\Delta\theta$	Temperaturunterschied	°C od. K	entfällt
$\theta_{a,cr}$	kritische Stahltemperatur	°C	entfällt
θ_g	Heißgastemperatur	°C	entfällt
θ_g	Heißgastemperatur in der Bauteilumgebung	°C	entfällt
θ_m	Oberflächentemperatur des Bauteils	°C	entfällt
θ_r	Strahlungstemperatur der Umgebung	°C	entfällt
τ	Einwirkzeit	min	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
a	Temperaturleitzahl ($= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$)	m^2/s	entfällt
c	Betondeckung	mm	entfällt
c	Umrechnungsfaktor	m^2/kWh	entfällt
c_p	spezifische Wärme bzw. spez. Wärmekapazität der Kaltgasschicht	J/kgK	entfällt
c_{Rauch}	Rauchkonzentration	g/m^3	entfällt
c_v	spezielle Wärme bei konstantem Volumen	kJ/kgK	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_{yk}, f_{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_{Fenster}	Höhe der Ventilationsöffnungen (Fenster, Türen etc.)	m	entfällt
\dot{h}_c	die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandnebenerscheinungen im Brandraum freigesetzte Energie	J/s = W	entfällt
\dot{h}_g	die im Brandraum pro Zeiteinheit gespeicherte Energie der Rauchgase, welche die Brandraumtemperatur bestimmt	J/s = W	entfällt

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

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	W/m ²	entfällt
$\dot{h}_{net,c}$	konvektiver Anteil der Wärmestromdichte	W/m ²	entfällt
$\dot{h}_{net,r}$	radiativer Anteil der Wärmestromdichte	W/m ²	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}_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}_P	Plume-Massenstrom	kg/s	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
\dot{m}_{Pl}	Massenstrom des Plumes in der Höhe z	kg/s	entfällt
p	Druck im Raum	Pa	entfällt
p_f	Versagenswahrscheinlichkeit	-	entfällt
$p_{f,fi}$	bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall	-	entfällt
p_{fi}	Auftretenswahrscheinlichkeit von mindestens einem fortentwickelten Brand (Schadenfeuer)	-	entfällt
Δp	Druckdifferenz	Pa	entfällt
q	Brandlastdichte	MJ/m ²	entfällt
q_m	mittlere Brandlastdichte	MJ/m ²	entfällt
q_R	rechnerische Brandbelastung	kWh/m ²	entfällt
r	Abstand des Sprinklers von der Plume-Achse	m	entfällt
r	radialer Abstand zur Plume-Achse	m	entfällt
t	Zeit	s	entfällt
t	Zeit nach Brandbeginn bzw. Branddauer	s	entfällt
t_{act}	Sprinklerauslösezeit	s	entfällt
t_{act}	Zeitpunkt bis zum Aktivieren einer Löschanlage	s	entfällt
$t_{ä}$	äquivalente Branddauer	min	entfällt
t_{con}	Zeitpunkt der Brandkontrolle	s	entfällt
t_g	Brandentwicklungszeit bzw. Branddauer bis zum Erreichen einer Brandstärke von 1 MW	s	entfällt
t_{sup}	Zeitpunkt der Brandedindämmung	s	entfällt

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
t_{Brand}	Branddauer	min	entfällt
Δt	Zeitintervall	s	entfällt
erf t_f	rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer	min	entfällt
u bzw. a	Achsabstand	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/min	0,50 bis 0,75
v_{aus}	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in horizontaler 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	$\geq 0,07$
w	Wärmeabzugsfaktor nach DIN 18230-1	-	entfällt
x, y, z	Raumkoordinaten	m	entfällt
z	Höhe des Plumes oberhalb der Brandherdgrundfläche bzw. vertikaler Abstand zwischen Brandherdoberfläche und Berechnungsort	m	entfällt
z	Differenz zwischen Deckenhöhe und Brandherdhöhe	m	entfällt
z_0	Rauhigkeitsparameter		entfällt
z_s	Höhe der Rauchschichtuntergrenze	m	entfällt
$z_{l,1}$	Distanz des realen Brandherdes zur Grenzfläche zwischen oberer und unterer Schicht	m	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
$z_{l,2}$	Abstand der „virtuellen Wärmequelle“ zur Grenzfläche zwischen oberer heißer Rauchgasschicht und Kaltgasschicht	m	entfällt
$A_d(t)$	Bemessungswert der indirekten Einwirkungen	-	entfällt
A_f	Grundfläche des Brandraumes	m^2	entfällt
A_i	innere umschließende Fläche	m^2	entfällt
A_{Brand}	Brandfläche nach der Branddauer t_{Brand}	m^2	entfällt
$A_{Fenster}$	Fläche der Fenster als Zuluftöffnung	m^2	entfällt
A_t	innere Oberfläche des Brandraumes	m^2	entfällt
A_w	Fensterfläche	m^2	entfällt
C	örtlich gemessene Konzentration		entfällt
C	empirischer Parameter in Relation für Erkennungsweite	-	2 bis 10
C_0	Ausgangskonzentration		entfällt
C_T	Konstante	-	9,115
D	Brandherddurchmesser	m	entfällt
D_f	Branddurchmesser	m	entfällt
D_m	Rauchpotential (bezogen auf D_L)	m^2/g	entfällt
D_L	optische Rauchdichte pro Weglänge	1/m	entfällt
E	innere Energie des Rauchgases im Raum	kJ	entfällt
$E_{d,fi,t}$	Bemessungswert der Einwirkungen nach EC 1 Teil 1	-	entfällt
F	normierter Quotient im FED-Modell	-	entfällt
F_s	spezifischer Personenstrom	P./s·m	entfällt

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
G_k	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen	-	entfällt
H	Abstand zwischen Brandherd und Decke	m	entfällt
H_{hu}	mittlerer unterer Heizwert des Stoffes oder der Mischung aus verschiedenen Stoffen (Mittelwert über die Massenanteile)	kWh/kg	siehe DIN 18230-3
H_u	unterer Heizwert der brennbaren Stoffe 1 kWh = 3.600 kJ	kJ/kg od. kWh/kg	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
M	Menge / Masse	kg	entfällt
P	Nutzeranzahl	-	entfällt
\dot{Q}	Wärmefreisetzungsr率e	kW od. MW	entfällt
\dot{Q}	aktuelle Wärmefreisetzungsr率e auf der Brandfläche A_{Brand} zum Zeitpunkt t	kW	entfällt
$\dot{Q}(t)$	Wärmefreisetzungsr率e	kW	entfällt
$\dot{Q}(t_{act})$	Wärmefreisetzungsr率e 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 Wärmefreisetzungsr率e im Löschanlagenkontrollierten Fall	MW	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
\dot{Q}_{FO}	Brandleistung, bei der ein Flash-over eintritt	kW	entfällt
\dot{Q}_R	Energieverlust aufgrund von Strahlung	kW	entfällt
$\max\dot{Q}_{vent}$	maximale Brandleistung in kleinen Räumen mit begrenzter Zuluftöffnung	kW	entfällt
\dot{Q}	Wärmefreisetzungsr率e	kW	entfällt
\dot{Q}	Energiefreisetzungsr率e	kW	entfällt
\dot{Q}	Energiefreisetzungsr率e des realen Brandherdes	kW	entfällt
\dot{Q}_c	konvektive Wärmeleistung	kW	entfällt
\dot{Q}^*	dimensionslose Wärmefreisetzungsr率e	-	entfällt
$\dot{Q}_{I,1}^*$	dimensionslose Energiefreisetzungsr率e des realen Brandherdes	-	entfällt
$\dot{Q}_{I,2}^*$	dimensionslose Energiefreisetzungsr率e der „virtuellen Wärmequelle“	-	entfällt
R	den Widerstand beschreibende Zustandsvariable	-	entfällt
R	allgemeine Gaskonstante	J/Kmol	8,314
$R_{fi,d,0}$	Bauteilwiderstand zum Zeitpunkt t = 0	-	entfällt
R_{isk}	Risikoindex	-	entfällt
RTI	Response Time Index	$\sqrt{m \cdot s}$	entfällt
\dot{R}	die pro Zeiteinheit umgesetzte Brandlast, welche die Energiefreisetzung bewirkt	kg/s	entfällt
S	die Einwirkung beschreibende Zustandsvariable	-	entfällt
S	Erkennungsweite	m	entfällt
T	Temperatur	K	entfällt

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
T	Temperatur der Gasmischung (Rauchgase) im Rauch	°C	entfällt
T_{∞}	Temperatur der Umgebungsluft	°C od. K	entfällt
T_{∞}	Temperatur der Kaltgasschicht	K	entfällt
T_{jet}	Ceiling Jet-Temperatur	°C	entfällt
$T_{jet,t}$	Temperatur im Ceiling Jet zum Zeitpunkt t	°C	entfällt
$T_{jet,t+\Delta t}$	Temperatur im Ceiling Jet im nächsten Zeitschritt	°C	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_{jet}	Temperaturdifferenz zwischen Ceiling Jet und Heißgasschicht	°C	entfällt
V	Volumen des Raumes (konstant)	m^3	entfällt
v	Gehgeschwindigkeit	m/s	entfällt
λ	Verdünnungsverhältnis ($= C_0/C$)	-	entfällt
V_{is}	Mindestsichtweite	m	entfällt
V_l	Volumen der Lufschicht	m^3	entfällt
V_s	Volumen der Rauchgasschicht	m^3	entfällt
V_{Hyp}	Verstärkungsfaktor zur Abschätzung des Effektes der Hyperventilation		entfällt
$\text{Winkel}_{\text{Ausbreitung}}$	Winkel der Brandausbreitung	Grad	360

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
X_k	charakteristische Wert einer streuenden Größe	-	entfällt
Y_{Rauch}	Rauchpartikel-Entstehungsanteil	g/g	entfällt
Z	Sicherheitsabstand	-	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 eines brandschutztechnischen Problems mit Hilfe des Leitfadens dargestellt werden [A2.23 bis A2.27]. Es handelt sich dabei um ein Hörsaalgebäude mit angrenzendem atriumartigen Bürogebäude. Bild A2.1 zeigt eine perspektivische Außenansicht der beiden Gebäude.

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 (Bild A2.3). Im Bereich der Bühne sind zu beiden Seiten des Gebäudes Fluchttüren in der Fassade.

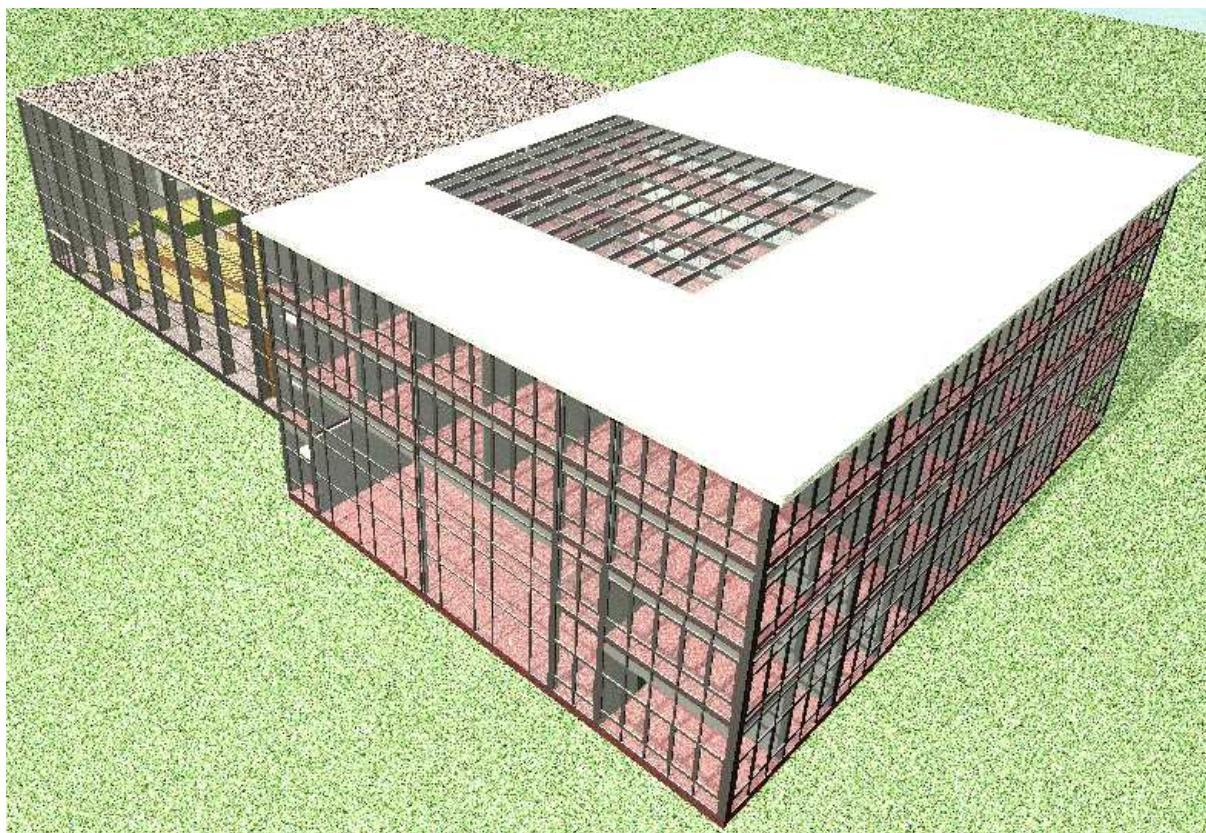


Bild A2.1 Gesamtansicht Hörsaal- und Bürogebäude

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

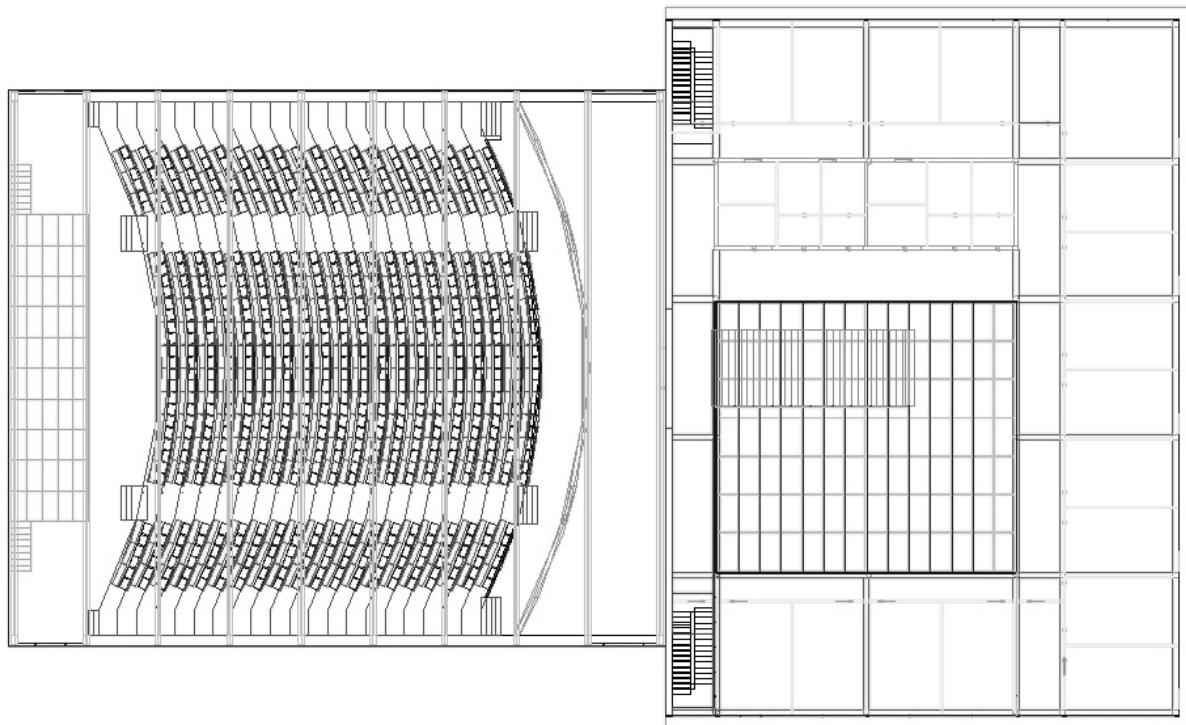


Bild A2.2 Grundriss des Hörsaal- und Bürogebäudes



Bild A2.3 Aufgang zum Hörsaal aus dem Atrium des Bürogebäudes

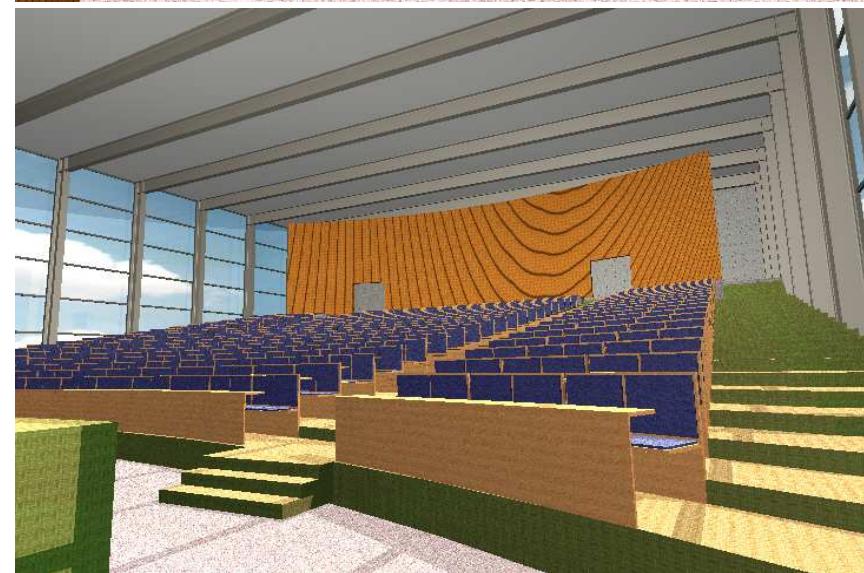


Bild A2.4 Ansichten des Hörsaalgebäudes

Das Hörsaalgebäude besteht aus einer Stahlrahmenkonstruktion (Stützen und Riegel), die Rückwand als Übergang zum Atrium ist als Brandwand ausgeführt. Die Seitenwände sind als Stahl-Glas-Fassade ausgebildet. Das Dach besteht aus einer nichtbrennbaren Sandwich-elementdecke. Für die Rauchableitung im Brandfall stehen öffnbare Fenster zur Zu- und Abluft auf beiden Seiten des Gebäudes zur Verfügung.

Um das innenliegende Atrium des Verwaltungsgebäudes führen offene Galerien, der Zugang zum Hörsaal befindet sich im 1. Obergeschoss. Im Dach des Atriums sind RWA Anlagen angeordnet. Zuluft für die Rauchableitung wird über den zweigeschossigen Eingangsbereich bereitgestellt. Bei einem Brand im Hörsaal werden fliehende Personen versuchen überwiegend durch das Atrium ins Freie zu gelangen.

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 drei Szenarien zu untersuchen:

- Ein vollentwickelter Brand ohne Einwirkung von Löschmaßnahmen mit einer Energiefreisetzung 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 Energiefreisetzung von 38 MW und klingt danach ab. Dieses Szenario wird bei der Bewertung der Personensicherheit im Hörsaal verwendet.
- Ein durch Sprinklereinfluss stark reduzierter Brand mit einer kurzfristigen maximalen Energiefreisetzung von 1,8 MW dient dazu, im Atrium des Bürogebäudes die Personensicherheit fliehender Personen aus dem Hörsaal bewerten zu können.

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, was entweder nach DIN 4102 Teil 4 oder nach vereinfachten und allgemeinen Rechenverfahren entsprechend Eurocode möglich ist. Unter Verwendung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften und der ermittelten Temperatur-Zeit-Kurve für die Rauchgase werden die Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer der Tragkonstruktion für den Hörsaal mit den nachfolgenden Verfahren bestimmt und bewertet:

- Bemessung der Konstruktion mit Tabellen nach DIN 4102 Teil 4,
- Bemessung der Konstruktion mit dem vereinfachten Verfahren nach EC3,
- Bestimmung der Bauteiltemperaturen mit einem 3D-Finite Elemente Verfahren.

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,
- Erkennungsweite,
- Gaskonzentrationen.

Als maßgebend für die Personensicherheit werden die beiden Brandszenarien im Hörsaal und im Atrium des Bürogebäudes angenommen. Für die Simulation der Brände wird ein CFD Modell eingesetzt, um den notwendigen Detaillierungsgrad der Aussagen hinsichtlich der Schutzzielkriterien zu gewährleisten. Beispielsweise werden die Zustände im Hörsaal und Atrium beurteilt und die Entfluchtungsverläufe bewertet, indem unterschiedliche Modelle wie die Kapazitätsanalyse und das dynamische Strömungsmodell eingesetzt werden. Die Ergebnisse werden mit den Angaben in der MVStättV verglichen.

A2.2 Schutzziele, Brandszenarien und Bemessungsbrände

A2.2.1 Schutzinteressen und Schutzziele im Anwendungsbeispiel

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 anzutragen, 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, so dass die Rettungswege ausreichend lange zur Verfügung stehen, d. h. rauchfrei gehalten werden können. Das Schutzziel einer lange zur Verfügung stehenden und ausreichend hohen rauchgasarmen Schicht ist als derart wichtig zu betrachten, weil die Verhältnisse in der Heißgassschicht auch in größerer Entfernung vom Brandgeschehen für die Gesundheit und das Leben der Personen eine große Gefahr darstellen [A2.3]. Außerdem ist die rauchgasarme Schicht erforderlich, um einen sicheren und wirkungsvollen Einsatz der Feuerwehr zu ermöglichen. Bei der Betrachtung des Risikos stehen nach [A2.4] die Anzahl der Besucher und die Größe der Versammlungsräume im Vordergrund.

Im vorliegenden Beispiel werden die Anforderungen nach § 7 MVStättV dahingehend verletzt, dass die maximale Rettungsweglänge mäßig überschritten wird und daher ein rechne-

rischer 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 die in der MVStättV geforderte Höhe der raucharmen Schicht von $h = 2,5$ m. Diese setzt sich zusammen aus der durchschnittlichen Körperhöhe eines Menschen und einem Sicherheitsbeiwert [A2.4]. Die in Tabelle 8.2 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 sich über die Zeit kontinuierlich verändernden Wert liefert.

Gemäß [A2.4] 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 m^2 . 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 [A2.4] 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 – d. h. F 90-AB unter ETK-Brand – auszuführen ist. Als Randbedingung muss auch die Trennwand zwischen Hörsaalgebäude und Bürogebäude feuerbeständig ausgebildet werden.

Darüber hinaus bestehen private Schutzinteressen dahingehend, dass in den Räumen des Bürogebäudes (Institutsgebäude) auch hochwertige Versuchseinrichtungen vorhanden sind sowie kostbare Substanzen gelagert werden sollen. Eine Beschädigung oder gar ein Totalverlust durch die Einwirkung eines Brandes oder dessen Produkte ist zu vermeiden.

A2.2.2 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Aus dem Leitfaden lassen sich zahlreiche Angaben und Möglichkeiten für die Entwicklung von Bemessungsbränden für die einzelnen Brandphasen aus Bild 4.2 entnehmen. Nachfolgend sollen nun exemplarisch Bemessungsbrände, wie in Bild 4.3 schematisch dargestellt, für das Anwendungsbeispiel mit Hilfe des Leitfadens entwickelt werden. Die entwickelten Wärmefreisetzung-Zeitkurven stellen die Grundlage für die Berechnung der Rauch- und Temperaturentwicklung mit einem Feldmodell dar. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden wiederum als Eingangsgrößen für die Beurteilung der Standsicherheit des Hörsaldachs sowie der Entfluchtung verwendet.

Bemessungsbrandszenario 1 – Beurteilung der Tragkonstruktion:

Das zu Grunde gelegte Bemessungsbrandszenario klammert eine Schwellbrandphase und das Wirksamwerden von Löschmaßnahmen aus und stellt keinen Kleinbrand (spezifische Wärmefreisetzungsrates bis etwa 20 kW/m^2) 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 räumlichen 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 somit 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.

Die Wärmefreisetzung-Zeitkurve 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.

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:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad (\text{A2.1})$$

mit

- p_1 jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der Nutzungseinheit,
- p_2 Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Nutzer und 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 [$1/(m^2 \cdot a)$],
- a Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter und Jahr [$1/(m^2 \cdot a)$],
- 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.

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

Tabelle A2.1 Mittlere jährliche Auftretensrate von Bränden λ_1 je Quadratmeter Geschossfläche bzw. Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 je Nutzungseinheit für verschiedene Nutzungen (nach [10.26], [10.27])

Nutzung	Mittlere Auftretensrate je m^2 und Jahr	Auftretenswahrscheinlichkeit je Nutzungseinheit und Jahr		
		$p_1 = a \cdot A^b$	p_1	
	λ_1 [$1/(m^2 \cdot a)$]	a [$1/(m^2 \cdot a)$]	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 1,0	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

Für die vorliegende Versammlungsstätte wird p_1 angesetzt mit

$$p_1 = 2,0E - 2 \quad (\text{A2.4})$$

Zahlenwerte p_2 für die Brandbekämpfung durch eine öffentliche Feuerwehr bzw. eine Werkfeuerwehr werden in Tabelle A2.2 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. (A2.1) berücksichtigt werden.

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.

Für eine öffentliche Feuerwehr wird p_2 wie vorgeschlagen vereinfachend angenommen mit

$$p_2 = 0,2 \quad (\text{A2.5})$$

Die Löschaßnahmen der Feuerwehr und die Brandbekämpfung durch eine Löschanlage sind näherungsweise voneinander unabhängig, sodass sowohl p_2 als auch p_3 in Gl. (A2.1) eingesetzt werden dürfen.

Tabelle A2.2 Ausfallwahrscheinlichkeit p_2 bzw. p_3 von Brandbekämpfungsmaßnahmen

Brandbekämpfung durch	Ausfallwahrscheinlichkeit	
	p_2	p_3
öffentliche Feuerwehr mit Hilfsfrist < 15 min	0,2	
> 20 min	0,5	
Werkfeuerwehr mit Hilfsfrist ¹⁾ < 10 min (vier Staffeln)	0,02	
< 10 min (zwei Staffeln)	0,05	
Automatische Löschanlage Sprinkleranlage nach VdS/CEA-Standard ²⁾		0,02
in anderen Fällen		0,05
Sonstige Wasserlöschanlage		0,1
Gaslöschanlage		0,1

¹⁾ automatische Brandmeldung und Alarmierung werden vorausgesetzt

²⁾ Planung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung nach den anerkannten Regeln der Technik

Da in diesem Fall keine Löschanlage vorhanden ist, ist p_3

$$p_3 = 1 \quad (\text{A2.6})$$

Daraus ergibt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} eines Schadenfeuers zu

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = 2,0E - 2 \cdot 0,2 \cdot 1 = 4,0E - 3 \quad (\text{A2.7})$$

Erforderliche Zuverlässigkeit im Brandfall

Im Informativen Anhang B von EN 1990 [10.25] 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 A2.3 sind die Schadensfolgen sowie die Werte β und p_f für Grenzzustände der Tragfähigkeit und einen Bezugszeitraum von 1 Jahr zusammengestellt. Dabei gilt mit $\Phi()$ als Funktion der Standard-Normalverteilung

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (\text{A2.8})$$

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. (A2.3) kann eine bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ im Brandfall bzw. der damit verknüpfte Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wie folgt bestimmt werden

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \quad (A2.9)$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) \quad (A2.10)$$

Dabei ist Φ^{-1} die Umkehrfunktion der Standard-Normalverteilung.

Tabelle A2.3 Einstufung baulicher Anlagen in Schadensfolgen und Zuordnung von Zuverlässigkeitssklassen nach EN 1990 [10.25], Anhang B

Schadensfolgeklassen CC Zuverlässigkeitssklassen RC	Merkmale	Beispiele im Hochbau
CC3 RC3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen $\beta = 5,2$ $p_f = 1,0 \text{ E-7 (1/a)}$	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC2 RC2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen $\beta = 4,7$ $p_f = 1,3 \text{ E-6 (1/a)}$	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 $\beta = 4,2$ $p_f = 1,3 \text{ E-5 (1/a)}$	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr, (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

In diesem Fall ließe sich darüber diskutieren, ob ein so großer Hörsaal in RC 2 oder 3 einzustufen ist. Da es sich hier aber um ein Gebäude mit guten ebenerdigen Entfluchtungsmöglichkeiten handelt, wird die Zuverlässigkeitssklasse RC 2 gewählt.

$$p_f = 1,3 \text{ E-6} \quad (A2.11)$$

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1,3 \text{ E-6}}{4,0 \text{ E-3}} = 3,25 \text{ E-4} \quad (A2.12)$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) = \Phi^{-1}(1 - 3,25 \cdot 10^{-4}) = 3,41 \quad (A2.13)$$

Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandeinwirkung

Für Brandlasten in unterschiedlich genutzten Gebäuden gibt es nur eine begrenzte Anzahl von Datenquellen. In Eurocode 1 Teil 1-2, Anhang E [10.1] sind durchschnittliche Brandlastdichten (mittlere Brandlasten pro m² Geschoßfläche) für typische Nutzungen angegeben. Hierauf basieren die in Tabelle A2.4 zusammengestellten Mittelwerte und Standardabweichungen. Als charakteristischer Wert wird das 90 %-Quantil empfohlen, das in Anlehnung an [10.1] unter der Voraussetzung einer Gumbel-Verteilung mit einem Variationskoeffizienten von 0,3 berechnet wurde.

Tabelle A2.4 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
Industrie – Lager	1180	*)	2240
Industrie – Produktion	300	*)	590

*) Die Brandlastdichten in Industriegebäuden streuen stark. Die angegebenen Werte dienen als Anhalt; sie können eine genauere Ermittlung in der Regel nicht ersetzen.

Die Brandlastdichten in Tabelle A2.4 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 Brandlasten nach Tabelle A2.4 zu addieren. In diesem Fall werden die Brandlasten für das Hörsaalgebäude lokal erhoben.

Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi,q}$ kann aus Bild A2.5 (durchgezogene Kurve) in Abhängigkeit vom erforderlichen Zuverlässigkeitssindex β_{fi} abgelesen werden.

Alternativ kann der Teilsicherheitsbeiwert mit Gl. (A2.14) berechnet werden:

$$\gamma_{fi} = \frac{1 - V \cdot \sqrt{6}/\pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(\Phi(\alpha \cdot \beta_{fi})))]}{1 - V \cdot \sqrt{6}/\pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(0,9))]} \quad (\text{A2.14})$$

$\Phi()$ stellt die Funktion der Standard-Normalverteilung dar.

Dabei wird eine Gumbel-Verteilung mit einem Variationskoeffizienten $V = 0,3$ zu Grunde gelegt und der Sensitivitätsfaktor für die Ermittlung des Bemessungswertes beträgt $\alpha = 0,6$.

Wird die Brandlastdichte wie in diesem Fall für das spezifische Objekt ermittelt, sind die zufälligen Streuungen geringer. Daher kann der Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} mit Gl. (A2.15) berechnet werden (vgl. NA zum Eurocode 1 (BB.17)) unter Annahme einer Normalverteilung mit dem Variationskoeffizienten $V = 0,2$; der Sensitivitätsfaktor beträgt wiederum $\alpha = 0,6$. Dieser Teilsicherheitsbeiwert kann ebenfalls aus Bild A2.5 (gestrichelte Kurve) abgelesen werden.

$$\gamma_{fi,q} = \frac{1 + \alpha \cdot \beta_{fi} \cdot V}{1 + 1,282 \cdot V} = \frac{1 + 0,6 \cdot 3,41 \cdot 0,2}{1 + 1,282 \cdot 0,2} = 1,12 \quad (\text{A2.15})$$

Für die Berechnung des Teilsicherheitsbeiwertes für das Maximum der Energiefreisetzungsr率 beträgt der Sensitivitätsfaktor gemäß NA $\alpha = 0,5$. Für den Variationskoeffizienten werden wiederum $V = 0,2$ und eine Gumbel-Verteilung angesetzt, weshalb

$$\gamma_{fi,HRR} = \frac{1 - 0,2 \cdot \sqrt{6}/\pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(\Phi(0,5 \cdot 3,41)))]}{1 - 0,2 \cdot \sqrt{6}/\pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(0,9))]} = 1,10 \quad (\text{A2.16})$$

der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi,HRR}$ für die maximale Wärmefreisetzungsr率 \dot{Q}_{max} ($\equiv HRR$) nach Gl. (A2.14) ermittelt werden muss. Er ist in Bild A2.5 als rote durchgezogene Kurve dargestellt und ergibt sich unter der Voraussetzung, dass der charakteristische Wert einer 90 %-Fraktile entspricht. Vereinfachend darf der Teilsicherheitsbeiwert unabhängig von β_{fi} mit $\gamma_{fi,HRR} \approx 1,0$ angenommen werden.

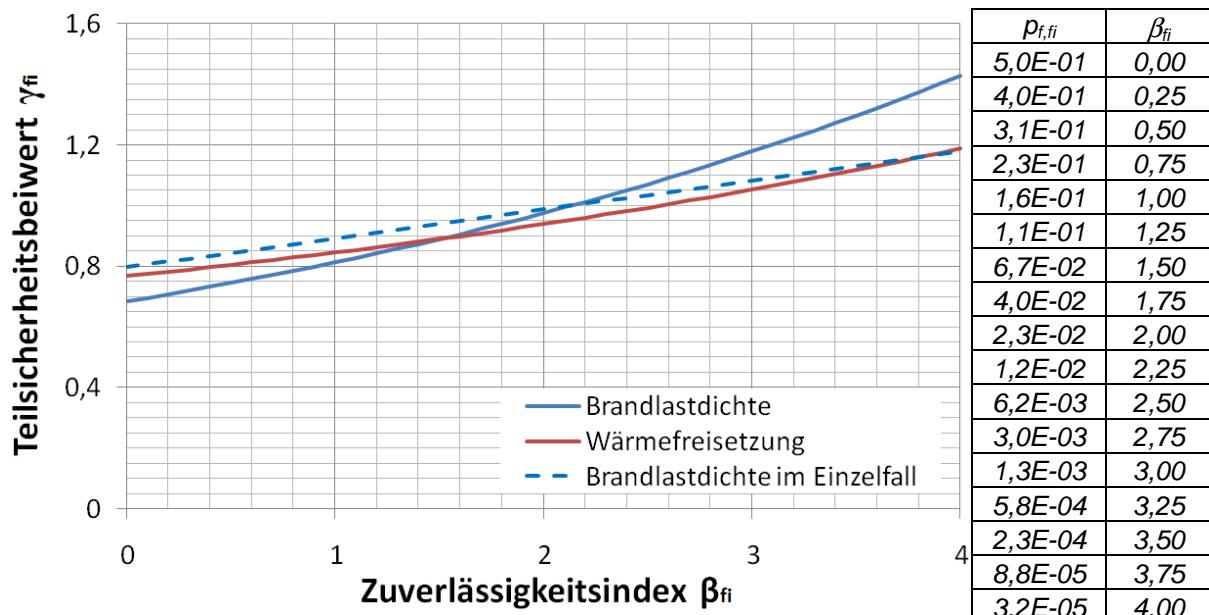


Bild A2.5 Teilsicherheitsbeiwerte für die maßgebenden Einflussgrößen eines Naturbrandes bezogen auf die definierten charakteristischen Werte in Abhängigkeit von dem Zuverlässigkeitssindex bzw. der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall

Die Stuhl- und Tischreihen aus Holz stellen die zu berücksichtigende Brandlast dar, die auf einer Fläche von etwa $20,5 \text{ m} \times 20,0 \text{ m} = 410 \text{ m}^2$ angeordnet sind (vgl. Bild A2.6). Werden hiervon etwa 22 % für die vorhandenen Zwischenräume zwischen Stuhl und Tisch bzw. zwischen den einzelnen Sitzreihen abgezogen, ergibt sich eine gesamte Brandfläche von etwa $0,78 \times 410 \text{ m}^2 = 320 \text{ m}^2$. Die Grundfläche des Hörsaals errechnet sich mit $28,9 \text{ m} \times 34,0 \text{ m}$ zu etwas weniger als 1.000 m^2 .

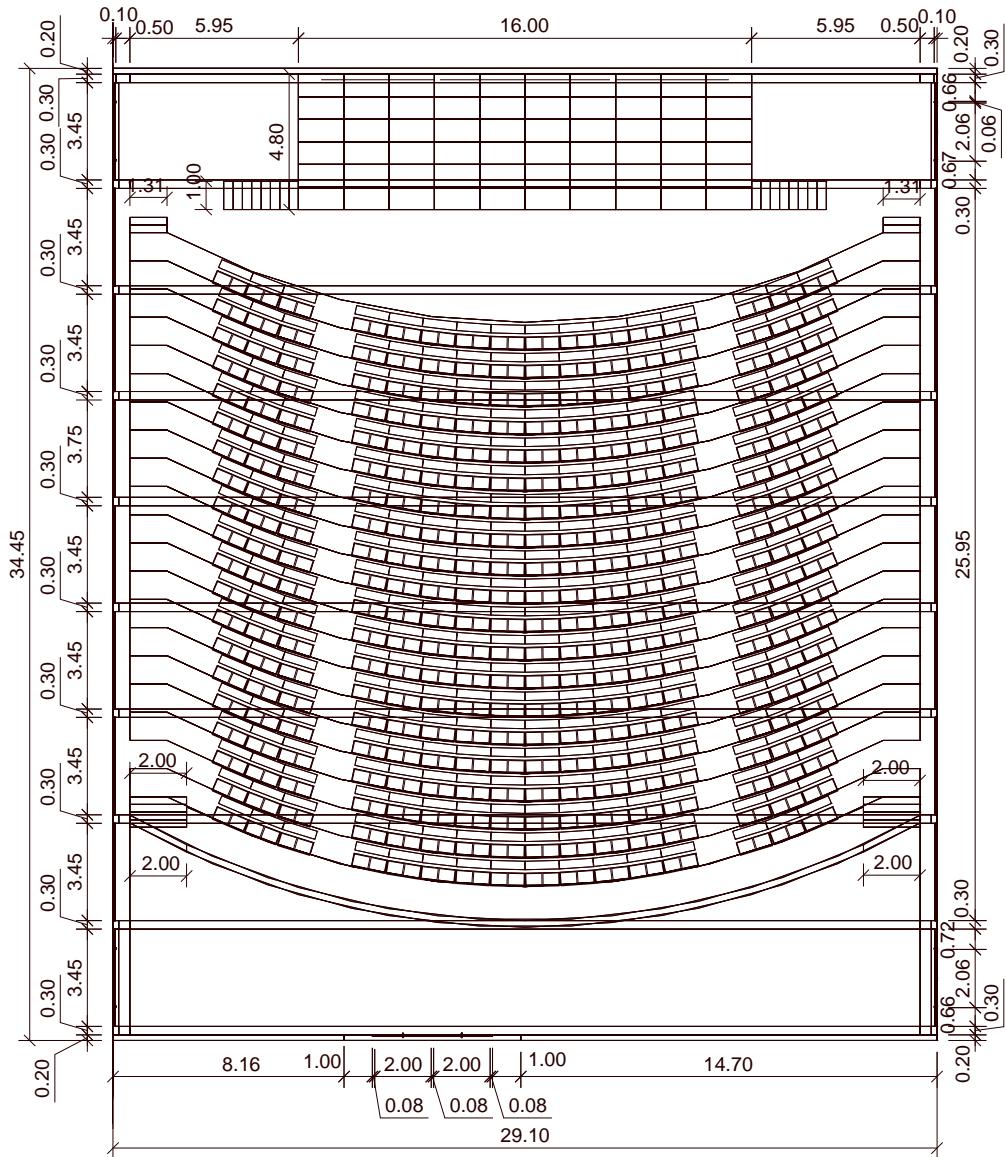


Bild A2.6 Grundriss des Hörsaalgebäudes

Bei einer Dichte des Holzes von etwa 500 kg/m^3 und einer angenommenen Gesamtdicke aller Holzteile (Sitzfläche, Tischfläche, Lehne, usw.) von 12 cm ist demnach eine brennbare Masse von $500 \text{ kg/m}^3 \times 0,12 \text{ m} \times 320 \text{ m}^2 = 19.200 \text{ kg}$ zu berücksichtigen. Der untere Heizwert H_u für Holz (Möbel) kann mit etwa 18,3 MJ/kg angenommen werden (vgl. Tabelle A4.1 für Schule / Klassenräume), die gesamte Brandlast ergibt sich dann folgerichtig zu $19.200 \text{ kg} \times 18,3 \text{ MJ/kg} = 351.360 \text{ MJ}$ also etwa

$$Q_{\max} = 351 \text{ GJ} . \quad (\text{A2.17})$$

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

Die charakteristische, mittlere Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche beträgt demnach

$$q_{f,k} = Q_{\max} / A = 351 \text{ GJ} / 1000 \text{ m}^2 = 351 \text{ MJ/m}^2 . \quad (\text{A2.18})$$

Der Bemessungswert der Brandlastdichte ist definiert als:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \gamma_{fi,q} \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (\text{A2.19})$$

Dabei ist:

- $q_{f,k}$ die charakteristische Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche [MJ/m^2];
- γ_{fi} ein Teilsicherheitsbeiwert, der die Auftretenswahrscheinlichkeit eines vollentwickelten Brandes in der Nutzungseinheit sowie die erforderliche Zuverlässigkeit der Bauteile berücksichtigt (hier: 1,12 gemäß Gl. (A2.15))
- m Abbrandfaktor, der die in der Regel unvollständige Verbrennung pauschal berücksichtigt; vereinfacht darf $m = 0,8$ angenommen werden.

Mit den entsprechenden Werten ergibt sich aus (A2.19) der Bemessungswert der auf die Grundfläche des Hörsaals bezogenen, mittleren Brandlastdichte für das Anwendungsbeispiel zu

$$q_{f,d} = 351 \cdot 0,8 \cdot 1,12 = 315 \text{ MJ/m}^2 \quad (\text{A2.20a})$$

bzw. der Bemessungswert der gesamten Brandlast zu

$$Q_{f,d} = 315 \cdot 1000 = 315 \text{ GJ}. \quad (\text{A2.20b})$$

Vergleicht man diesen Wert mit den 90 %-Fraktilen der Brandlastdichten bei unterschiedlichen Nutzungen, wie sie in den Tabellen des Anhangs zu Kapitel 4 enthalten sind, ist zunächst der Teilsicherheitsbeiwert für die pauschalierten Annahmen der Brandlast zu ermitteln. Als Variationskoeffizient ist 0,3 anzusetzen.

$$\gamma_{fi} = \frac{1 - 0,3 \cdot \sqrt{6}/\pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(\Phi(0,6 \cdot 3,41)))]}{1 - 0,3 \cdot \sqrt{6}/\pi \cdot [0,5772 + \ln(-\ln(0,9))]} = 1,27 \quad (\text{A2.21})$$

Es zeigt sich damit, dass der ermittelte Wert zwischen den in Tabelle A4.1 enthaltenen Angaben eines Theater-/Kino- ($1,27 \times 0,8 \times 417 \text{ MJ/m}^2 = 424 \text{ MJ/m}^2$) und denen eines Hörsaals ($1,27 \times 0,8 \times 195 \text{ MJ/m}^2 = 198 \text{ MJ/m}^2$) – bei Annahme einer identischen Verteilung und einem identischen Variationskoeffizienten wie bei einem Theater-/Kinosaal – liegt. Dies kann als gute Übereinstimmung und Bestätigung angesehen werden.

Zur Bestimmung der maximalen Wärmefreisetzungsraten und der Geschwindigkeit, mit der sich der Brand entwickelt, werden gestapelte Holzpaletten als äquivalente Brandlast zu Grunde gelegt. Die Tabelle A4.3 des Leitfadens enthält die hierfür benötigten Angaben. Betrachtet man eine Stapelung von zwei Holzpaletten als realistische Annahme der äquivalenten Brandlast, ergibt sich in Verbindung mit Gl. (A2.16) als maximale spezifische Wärmefreisetzungsraten ein Wert von $(2 \times 0,14 \text{ m}) / 0,5 \text{ m} \times 1.249 \text{ kW/m}^2 \times 1,10 = 769 \text{ kW/m}^2$ also etwa

0,7 MW/m². Auch dieser Wert kann mit Tabellen zur maximalen spezifischen Wärmefreisetzungsraten für verschiedene Nutzungen verglichen werden. Der Wert für waagerecht gelagertes Holz / PMMA, bei dem die obere Fläche des Stapels brennt, beträgt dort 0,720 MW/m² x 1,10 = 0,792 MW/m², so dass auch hier die Annahme mit Erfahrungswerten übereinstimmt.

Um letztlich die maximale Wärmefreisetzungsraten auf der Brandfläche zu bestimmen, muss der flächenbezogene Wert mit der Größe der Brandfläche multipliziert werden, und es ergibt sich:

$$\dot{Q}_{\max} = 0,7 \text{ MW/m}^2 \cdot 320 \text{ m}^2 = 224 \text{ MW}. \quad (\text{A2.22})$$

Zum Vergleich: Tabelle A4.1 gibt beispielsweise für eine Büronutzung (ohne Sprinkleranlage) eine maximale spezifische Wärmefreisetzungsraten von etwa 250 kW/m² an, woraus sich bei etwa 1.000 m² Grundfläche des Hörsaals eine nutzungsbezogene maximale Wärmefreisetzungsraten von 1,10 x 250 MW = 275 MW errechnet.

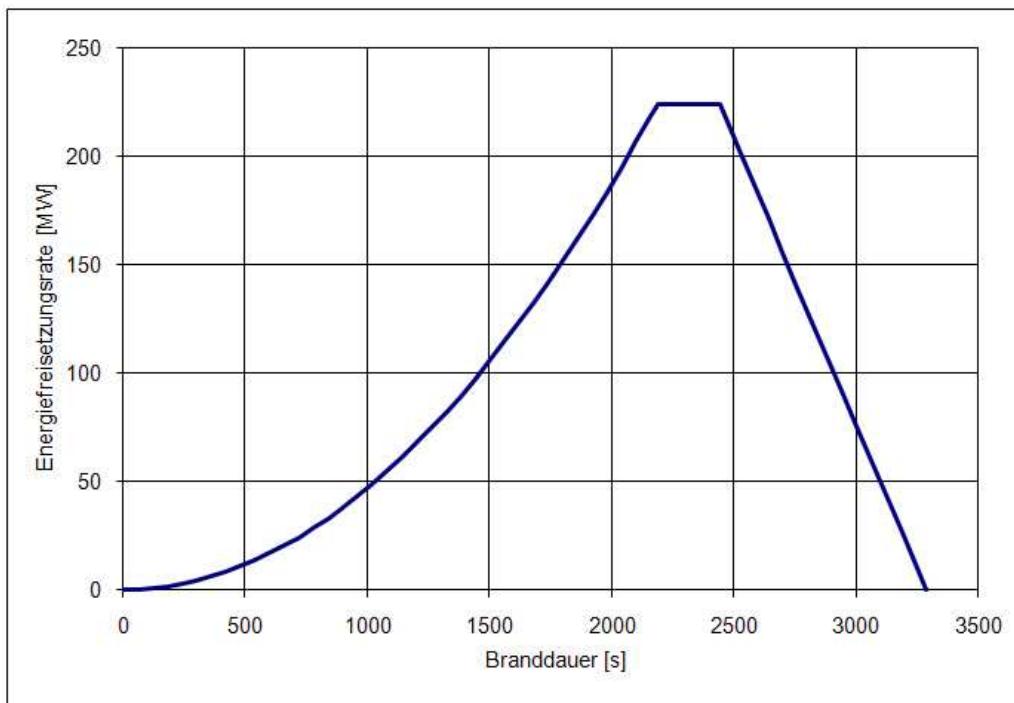


Bild A2.7 Bemessungsbrand für die Beurteilung der Dachtragkonstruktion

Aus Tabelle A4.3 ist zudem zu entnehmen, dass die Brandentwicklung mit „mittlerer“ bis „schneller“ Geschwindigkeit erfolgt. Im vorliegenden Fall wird eine schnelle Geschwindigkeit zu Grunde gelegt, da unter Umständen noch eine (aufgrund fehlender Angaben im Leitfaden) hier nicht berücksichtigte Polsterung der Sitzflächen mit „schneller“ bis „sehr schneller“ Brandentwicklung vorgesehen werden könnte. Mit Hilfe von Tabelle 4.6 ergibt sich somit ein α -Wert von 0,046890 kW/s², der zusammen mit der maximalen Wärmefreisetzungsraten in Gleichung (4.2) eingesetzt werden kann. Das Ergebnis ist der Endzeitpunkt t_1 der Brandausbreitungsphase bzw. der Zeitpunkt des Übergangs von Brandausbreitungs- zu Vollbrandphase.

$$\dot{Q}(t_1) = 0,046890 \frac{\text{kW}}{\text{s}^2} \cdot t_1^2 = 224.000 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow t_1 = 2.186 \text{ s} \quad (\text{A2.23})$$

Den Verlauf des Bemessungsbrandes für die Brandausbreitungsphase zeigt der ansteigende Ast in Bild A2.7.

Mit Erreichen des Endes der Brandausbreitungsphase, d. h. wenn die gesamte Brandlast im Hörsaal in das Brandgeschehen eingebunden ist, verändert sich der Zustand des Brandes und die Vollbrandphase beginnt. Eine Notwendigkeit zur Beschreibung der Vollbrandphase ergibt sich vornehmlich bei der Beurteilung der Gebäudekonstruktion, die auch unter diesen Bedingungen nicht versagen darf, also wenn z. B. Löschaßnahmen der Feuerwehr oder Sprinkleranlagen ohne Erfolg bleiben. Aus diesem Grund wird eine Beeinflussung des Brandes durch den Feuerwehreinsatz und das Wirksamwerden von Löschaßnahmen in diesem Brandszenario bewusst ausgeklammert.

Wie bereits gesagt, handelt es sich im vorliegenden Anwendungsbeispiel um einen brandlastgesteuerten Brand, da ein Mangel an Verbrennungsluft nicht zu unterstellen ist. Daher kann, wie Bild A2.7 zeigt, ein konstanter Verlauf der Wärmefreisetzung-Zeitkurve auf dem Niveau der ermittelten maximalen Wärmefreisetzungsraten im Hörsaal als Bemessungsbrand während der Vollbrandphase vorgegeben werden.

Um den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzung-Zeitkurve vollständig angeben zu können, werden neben den bereits ermittelten Größen noch die Zeiten t_2 – Übergang von der Vollbrandphase zur Abklingphase – und t_3 – Ende der Abklingphase und damit Ende des Bemessungsbrandes – benötigt. Mit (A2.20b) und (A2.22) sowie der Kenntnis, dass zu Beginn der Abklingphase bereits 70 % der vorhandenen Brandlast umgesetzt sind, lässt sich t_2 wie folgt bestimmen:

$$Q(t_1) = \int_0^{t_1} \dot{Q}(t) dt = \alpha \cdot \frac{t_1^3}{3} = 0,046890 \cdot \frac{2.186^3}{3} = 163.271 \text{ MJ}$$

$$Q(t_2 - t_1) = 0,7 \cdot Q_{\max} - Q(t_1) = 57.229 \text{ MJ}$$

$$\Rightarrow t_2 = t_1 + \frac{Q(t_2 - t_1)}{\dot{Q}_{\max}} = 2.441 \text{ s} \quad (\text{A2.24})$$

Letztlich ergibt sich aus den verbleibenden 30 % Brandlast und dem linearen Abfall bis t_3 in Verbindung mit (4) das Ende des Bemessungsbrandes zu:

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot 0,3 \cdot Q_{\max}}{\dot{Q}_{\max}} = 3.285 \text{ s} \quad (\text{A2.25})$$

Den Verlauf des Bemessungsbrandes für die Beurteilung der Dachtragkonstruktion des Anwendungsbeispiels über alle Brandphasen hinweg zeigt Bild A2.7.

Aus den bisher gewonnenen Informationen kann zu Vergleichszwecken auf Grundlage der charakteristischen Werte eine (durchschnittliche) Abbrandgeschwindigkeit ermittelt werden.

Die spezifische Wärmefreisetzungsrates beträgt bezogen auf die Brandfläche $0,7 \text{ MW/m}^2$. Die charakteristische, mittlere Brandlastdichte von 351 MJ/m^2 bezieht sich auf die Grundfläche des Hörsaals und muss daher mit einem Faktor $1000 \text{ m}^2 / 320 \text{ m}^2$ auf die 320 m^2 große Brandfläche umgerechnet werden, woraus sich ein Wert von 1097 MJ/m^2 ergibt. Die brennbare Masse beträgt dabei $m = 60 \text{ kg je m}^2$ Brandfläche. Unterstellt man zunächst zur Vereinfachung einen konstanten Verlauf (Rechteck) der Wärmefreisetzung-Zeitkurve, so ergibt sich eine Branddauer von

$$t = \frac{1097 \text{ MJ/m}^2}{0,7 \text{ MW/m}^2} = 1567 \text{ s} \approx 26 \text{ min}$$

und dementsprechend eine Abbrandgeschwindigkeit von

$$v_{ab} = \frac{m}{t} = \frac{60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{26 \text{ min}} = 2,31 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{min}}.$$

Vergleicht man diesen Wert mit den Werten aus der Literatur ($v_{ab} = 0,9 - 1,2 \text{ kg/m}^2 \text{ min}$ für Holzmöbel [A2.28, A2.29]), so zeigt sich eine deutliche Abweichung. Der Grund hierfür liegt in der vereinfachten Annahme eines konstanten Verlaufes der Wärmefreisetzung-Zeitkurve. Denn wie Bild A2.7 zeigt, wird in der linearen Abkling- und insbesondere in der nicht-linearen Brandausbreitungsphase des Brandes deutlich weniger Brandlast verbrannt, als dies bei einem konstanten Verlauf der Fall ist. Es ergibt sich daher eine längere Branddauer t – beim nicht-linearen t^2 -Anstieg ergibt sich der Faktor 3; beim linear abfallenden Ast beträgt der Faktor 2. Folglich kann von einem 2 bis 3-fachen der zuvor ermittelten Branddauer t ausgegangen werden, was letztlich wieder auf die Gesamtbranddauer t_3 des Bemessungsbrandes nach Gleichung (A2.25) führt. Die (durchschnittliche) Abbrandgeschwindigkeit reduziert sich infolgedessen ebenfalls entsprechend um diesen Faktor und liegt damit exakt im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte.

Überdies kann hierdurch wegen $t_{ab,1m^2} > t_1$ festgehalten werden, dass der Zeitpunkt, zu dem die gesamte Brandfläche (gleichzeitig) brennt, existiert sowie dass das in Bild A2.7 dargestellte Plateau der Wärmefreisetzung-Zeitkurve erreicht wird und gerechtfertigt ist.

Ein alternativer Verlauf des in Bild A2.7 dargestellten Bemessungsbrandes unter sonst identischen Randbedingungen ergibt sich beispielsweise unter Berücksichtigung des Einsatzes der Feuerwehr. Denkbar ist ein Szenario, bei dem das Feuer trotz Löschmaßnahmen schwer zu beherrschen ist und infolge dessen längere Zeit mit einer niedrigeren Wärmefreisetzungsrates brennt, bis es schließlich mit Verbrauch der Brandlast gelöscht werden kann. Ebenso denkbar ist ein Szenario, bei dem das Feuer durch Löschmaßnahmen der ortsansässigen Feuerwehr lediglich unterdrückt, durch ein zeitversetztes Zuhilfekommen weiterer, benachbarter Feuerwehren jedoch kontrolliert bzw. schließlich gelöscht werden kann. Da für die Beurteilung der Tragkonstruktion ein Vollbrand ohne das Wirksamwerden von Löschmaßnahmen anzunehmen ist, bleiben diese beiden Brandszenarien für die Tragwerksbemessung außer acht.

Bemessungsbrandszenario 2 – Beurteilung der Entfluchtung des Hörsaals:

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, so dass ein Wirksamwerden von Löschmaßnahmen wahrscheinlich ist. Da der Zeitpunkt des Löscheinsatzes der Feuerwehr nicht genau festzulegen ist, wird für die Entfluchtung konservativ von 15 Minuten nach Brandbeginn ausgegangen. Innerhalb dieser Zeitspanne entwickelt sich der Brand aufgrund der ansonsten unveränderten Rahmenbedingungen entsprechend dem vorherigen Bemessungsbrand, wie dies ein Vergleich von Bild A2.8 mit Bild A2.7 zeigt. 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.

Von besonderer Bedeutung für die Entfluchtung ist im Falle eines Brandes die Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} . Um zu einem Vollbrand auf der gesamten bestuhlten Fläche gemäß Bemessungsbrandszenario 1 zu gelangen, würden $t_1 = 2.186$ Sekunden, d. h. etwa 36 Minuten vergehen. Die weiteste Entfernung zwischen dem Brandentstehungspunkt in der Mitte des Hörsaals und dem Punkt, der beim Vollbrand als letzter erreicht wird, beträgt dabei

$$s_{max} = \sqrt{\left(\frac{22 \text{ m}}{2}\right)^2 + \left(\frac{20 \text{ m}}{2}\right)^2} \approx 15 \text{ m}, \quad (\text{A2.26})$$

so dass sich eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit von etwa

$$v_{aus} = \frac{15 \text{ m}}{36 \text{ min}} \cdot 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} \approx 42 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \quad (\text{A2.27})$$

ergibt. Vergleicht man diesen Wert mit den Empfehlungen nach Tabelle 4.7 für eine „schnelle“ Brandausbreitung ($v_{aus} = 45 \text{ cm/min}$), so zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Größen im gewählten Brandszenario und den empfohlenen Werten. Konservativ wird für das Bemessungsbrandszenario zur Beurteilung der Entfluchtung des Hörsaals eine Brandausbreitungsgeschwindigkeit von $v_{aus} = 50 \text{ cm/min}$ angesetzt. Mit dieser Geschwindigkeit breitet sich der Brand ausgehend vom Brandherd nach allen Seiten hin gleichmäßig aus, wie dies in der Berechnung in A2.5 auch berücksichtigt wird, und es ergibt sich der in Bild A2.8 dargestellten Verlauf der gesamten Wärmefreisetzungsraten.

Nach der 15-minütigen ungehinderten Brandentwicklung, d. h. mit Beginn der Löschmaßnahmen, verläuft die Wärmefreisetzung-Zeitkurve 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 Entfluchtung des Hörsaals über alle Brandphasen hinweg zeigt Bild A2.8.

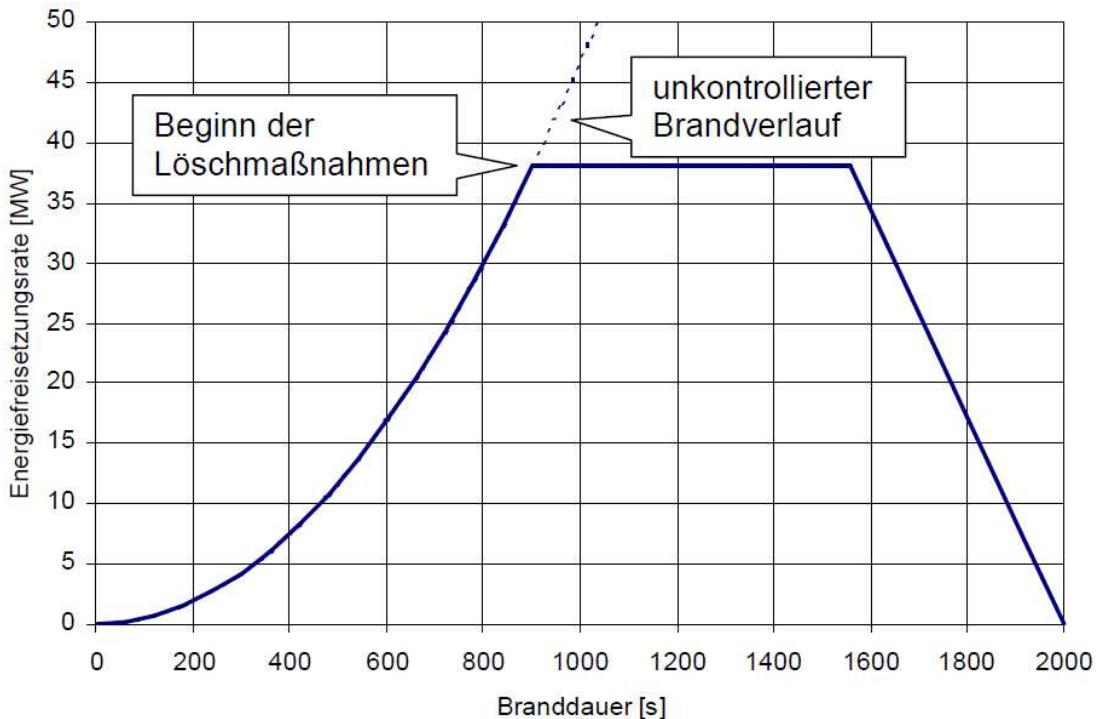


Bild A2.8 Bemessungsbrand für die Beurteilung der Entfluchtung des Hörsaals

Bemessungsbrandszenario 3 – Beurteilung der Entfluchtung des Atriums:

Für die Entfluchtung des Atriums im Bürogebäude ist ein weiterer, unabhängiger Bemessungsbrand zu entwickeln. Da die Ermittlung analog zu Bemessungsbrand 1 und 2 erfolgen kann, sollen an dieser Stelle nur die wesentlichen Eingangsdaten und die sich ergebende Wärmefreisetzung-Zeitkurve angegeben werden.

Das Brandszenario ist ein Brand im Empfangsbereich des Atriums. Dort ist auf $2,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} = 3,75 \text{ m}^2$ Grundfläche ein PC-Arbeitsplatz mit Empfangstheke und einer begrenzten Menge an Büroinventar angeordnet. Die 90%-Fraktile der Brandlastdichte für eine Büronutzung, wie sie hier angenommen wird, kann den Tabellen des Anhangs zu Kapitel 4 entnommen werden und beträgt 420 MJ/m^2 , so dass sich eine gesamte Brandlast von

$$Q_{\max} = 584 \text{ MJ/m}^2 \cdot 2,38 \text{ m} \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 1,03 = 1.575 \text{ MJ} \quad (\text{A2.28})$$

ergibt. Die Tabelle A4.8 des Leitfadens enthält die weiteren benötigten Angaben. Hieraus ergibt sich einerseits die maximale Wärmefreisetzungsr率e zu

$$\dot{Q}_{\max} = 1,96 \text{ MW} \cdot 0,92 = 1,8 \text{ MW} \quad (\text{A2.29})$$

und andererseits aus Tabelle 4.6 ein α -Wert von $0,0029231 \text{ kW/s}^2$ für eine „langsame“ Geschwindigkeit der Brandentwicklung. Werden diese Informationen verarbeitet, ergeben sich auf analogem Weg zu Bemessungsbrand 1 die Zeitpunkte t_1 , t_2 und t_3 , die zur Ermittlung der Wärmefreisetzung-Zeitkurve notwendig sind.

$$t_1 = 784 \text{ s}, t_2 = 1.135 \text{ s} \text{ und } t_3 = 1.660 \text{ s} \quad (\text{A2.30})$$

Gemäß § 19 MVStättV [A2.2] ist in „Foyers und Hallen, durch die Rettungswege aus anderen Versammlungsräumen führen [...], eine automatische Feuerlöschanlage [...]“ anzugeben. Aufgrund der besonderen baulichen Gegebenheiten mit z. T. sehr unterschiedlichen Deckenhöhen ist eine exakte Quantifizierung des Einflusses einer Sprinklerung schwierig und ein Auslösen unsicher bzw. u. U. nur zeitversetzt zu erwarten. Daher wird der Verlauf des Bemessungsbrandes für die Beurteilung der Entfluchtung des Atriums im vorliegenden Anwendungsbeispiel über alle Brandphasen hinweg gemäß Bild A2.9 gewählt.

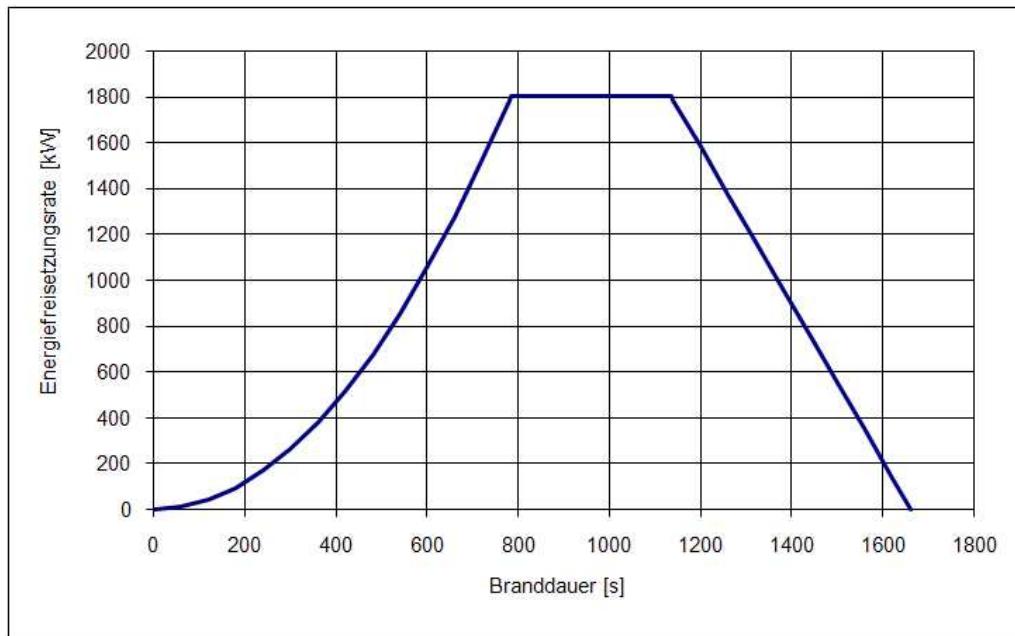


Bild A2.9 Bemessungsbrand für die Beurteilung der Entfluchtung des Atriums

Mit diesen Bemessungsbränden, denen die zu berücksichtigenden Schutzziele zu Grunde liegen, können im Weiteren die Brandwirkungen nach Ort und Zeit (Temperatur, Rauchausbreitung sowie weitere Brandprodukte) mit den Methoden des Brandschutzingenieurwesens (Zonen- oder Feldmodelle) berechnet werden.

A2.3 Ermittlung der Brandwirkungen mit Brandmodellen

A2.3.1 Fragestellung und Szenario am Beispiel

Vorgegeben ist das zuvor ermittelte Brandszenario für die Beurteilung der Dachtragkonstruktion des Hörsaals. Die zugehörigen Brandwirkungen sollen für die brandschutztechnische Bemessung der Stahlkonstruktion in A2.4 herangezogen werden.

Im Hinblick auf die Bauteilbemessung werden acht Rahmen in Stahlbauweise bestehend aus Stützen und Riegeln im Hörsaal betrachtet. Die Annahme, dass die größten Temperaturen im Bereich der Binder zu erwarten sind, die sich oberhalb der Sitzreihen befinden, wird mit den im Weiteren vorgestellten Randbedingungen für die Simulation nicht uneingeschränkt

bestätigt. 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 Energiefreisetzungsraten nicht berücksichtigt, was als ungünstigster Fall angesehen werden kann.

A2.3.2 Modellierung am Beispiel

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 wenn die Ergebnisse von den Strömungsbedingungen im Raum abhängen, sind Feldmodelle den Zonenmodellen vorzuziehen, auch wenn deren Einsatz mit erheblichem Aufwand verbunden ist.

Für die Berechnung der am Bauteil vorliegenden Rauchgastemperaturen wurde der Fire Dynamics Simulator in der Version 4 (FDS, [A2.5]) herangezogen, der in Kapitel 5 zu den validierten Modellen gezählt wird und bei der Berechnung der Rauchgastemperaturen im Vergleich zum Realbrandversuch (Tabelle 5.5) nur geringe Abweichungen aufwies. Das Modell eignet sich auch für spätere Fragestellungen, z. B. zur Berechnung der Rauchausbreitung und zur Berechnung der Höhe der rauchgasarmen Schicht, wie sie in A2.5 betrachtet werden. Bild A2.10 zeigt den simulierten Hörsaal im Modell. Für die Bauteilberechnung wurde von einer geschlossenen Verbindungstür zum anschließenden Atrium ausgegangen.

Bei der Eingabe der Modelleingabedatei für die Berechnung mit FDS, wurden folgende generelle Annahmen für die Geometrie und die Umfassungsbauteile gemacht:

- 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,

- 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 (Fensterfront) wurde ein thermisch „dünnes“ Material mit den Eigenschaften von Glas angenommen, allerdings kein Strahlungsaustausch mit der Umgebung gerechnet,
- 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 320 m² angenommen, die sich auf diese 5 Stufen gleichmäßig verteilt.

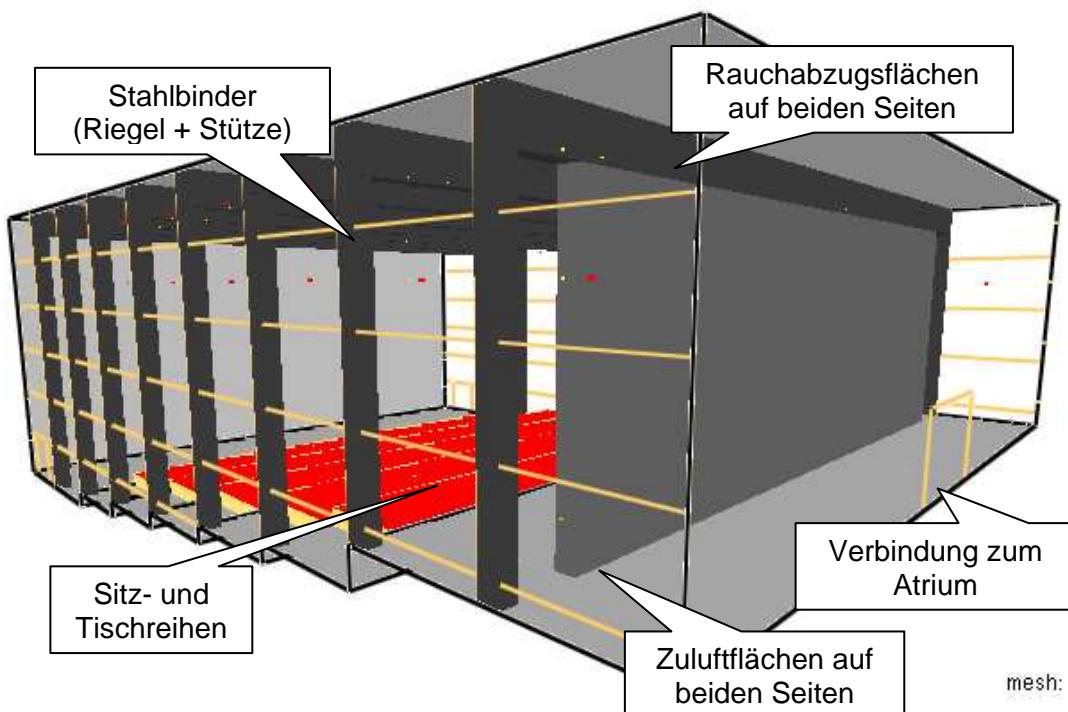


Bild A2.10 Modell des Hörsaals für die Berechnung mit FDS, dargestellt mit Smokeview

Zur weiteren Bauteilbemessung wurden bestimmte Messpunkte festgelegt, an denen die Gastemperaturen im Bereich der Binder alle 10 Sekunden in eine Datei gespeichert wurden. Bild A2.11 zeigt diese Messpunkte exemplarisch an einem der 8 Binder.

Die Rechenläufe mit unterschiedlichen Parametern sind in Tabelle A2.5 zusammengefasst. Drei Läufe dienten zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei verschiedenen Feinheiten der gewählten Zellen (Fall A). Mit dem Fall B_50 wird eine Brandausbreitung über die Stuhlreihen von unten nach oben nachgestellt und eine schnelle Brandausbreitung von 100 cm/min angesetzt (Tabelle 4.3). Eine Ausbreitung über die Mittellachse der unteren Sitzreihe (20 m) nach oben dauert daher 20 Minuten. Bei den Fällen A und B wurde noch kein Versagen der Fensterscheiben berücksichtigt. Die Fälle C berücksichtigen zusätzlich das Versagen der Fensterscheiben bei 300 °C, ein Parameter, der zu schwer vorhersagbaren Lüftungsverhältnissen im Berechnungsvolumen führt und nur mit Feldmodellen berechnet werden kann. In der Variante C_50_T wird zusätzlich das Eintreffen der Feuerwehr be-

rücksichtigt in Verbindung mit der Annahme, dass eine der unteren Türen des Hörsaals in der 10. Minute geöffnet wird. Die Varianten des Modelllaufs C werden grundsätzlich als die realistischeren Szenarios angesehen, da von einem Versagen der Fensterscheiben bei Erreichen einer Grenztemperatur ausgegangen werden kann. Für die Bewertung der unterschiedlichen Fälle wurden 30 Minuten der „realen“ Zeit berücksichtigt, für die spätere Bauauslegung wurde der kritischste Fall anschließend für 90 Minuten berechnet.

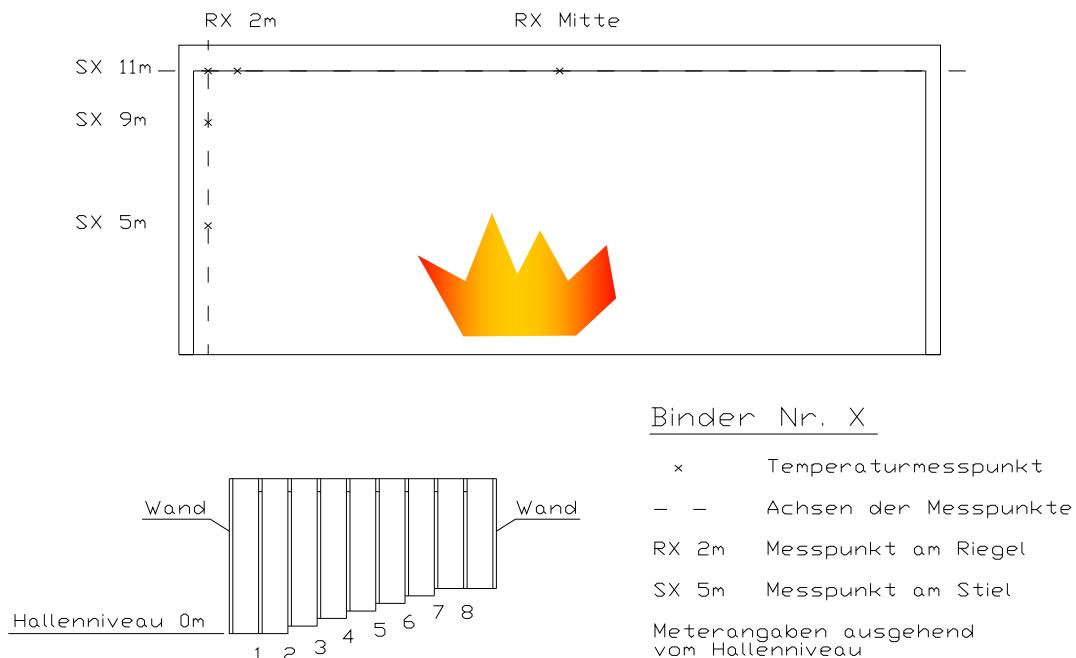


Bild A2.11 Systemskizze, Bezeichnung der Messstellen für die Gastemperaturen des Systems der Binder (Stütze + Riegel)

A2.3.3 Ergebnisse

Bild A2.12 zeigt einen Vergleich des Verlaufs der Gastemperatur im Bereich des Riegels 7 in Feldmitte, 1 m unterhalb der Decke für den Grundfall A (Versagen der Fensterscheiben nicht berücksichtigt) für drei verschiedene Feinheiten der Gitterzellen im Berechnungsvolumen. Man erkennt deutlich, dass in allen drei Modellläufen der Verlauf der Temperaturen vergleichbar ist, beim groben Gitter (Kantenlänge 50 cm) die Schwankungen aber teilweise sehr groß sind und die zeitlich lokalen Abweichungen der Temperatur bis zu 150 °C betragen.

Für Parameterstudien ist diese Zellengröße noch geeignet, für abschließende Untersuchungen eines Referenzfalles sollten aber feinere Gitter (z. B. mit der Kantenlänge 25 cm) benutzt werden. Bei dieser Feinheit treten geringere Schwankungen auf, die Unterschiede der Temperaturen bei Gitterzellen mit den Maßen 25 x 25 x 50 cm³ und 25 x 25 x 25 cm³ sind vergleichsweise gering. In Bild A2.13 sind die Temperaturverläufe in Feldmitte am Riegel 2, 1 m unterhalb der Decke für die verschiedenen Fälle mit einer Zellengröße von 50 cm Kantenlänge (siehe Tabelle A2.5) gegenübergestellt. Die Temperaturen sind im Fall C (Fenster, ohne Zuluft über Tür) mit knapp 600 °C am höchsten. In Bild A2.14 wird der Temperaturverlauf für dieselben Fälle, wie in Bild A2.13 in Feldmitte, 1 m unterhalb der Decke für

Riegel 4 dargestellt. Die höchsten Temperaturen werden hier mit ebenfalls knapp 600 °C im Fall C (Fenster + Zuluft über Tür) erreicht, wobei auch im Fall B (Berücksichtigung der Brandausbreitung) die Temperaturen nach 30 Minuten ähnlich hoch liegen, aber wesentlich später ansteigen.

Tabelle A2.5 Überblick Modellierung, gewählte Parameter

Bezeichnung Modelllauf	A_50	A_25_50	A_25	B_50	C_50	C_50_T
Zellengröße, Feinheit [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
Rechenzeit Pentium 2,8 GHz, 1 GB HS	8,6 h	57,8 h	154,2 h	4,3 h	11,6 h	11,7 h

*) Schrift fett und kursiv: Änderungen gegenüber Grundvariante A_50, HS: Hauptspeicher, Rechenzeit über 30 Minuten Simulation des „realen“ Szenarios

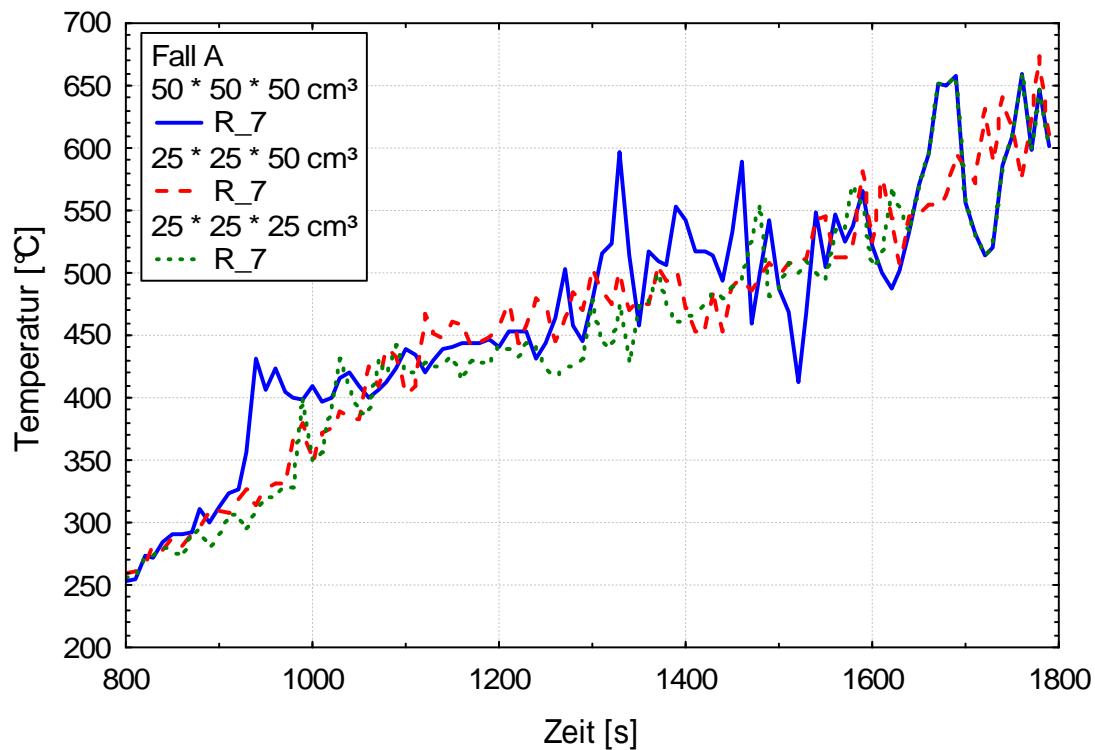


Bild A2.12 Verlauf der Temperatur am Riegel 7 in Feldmitte für 3 verschiedene Zellgrößen bzw. „Feinheiten“ des Gitters (siehe Tabelle A2.5)

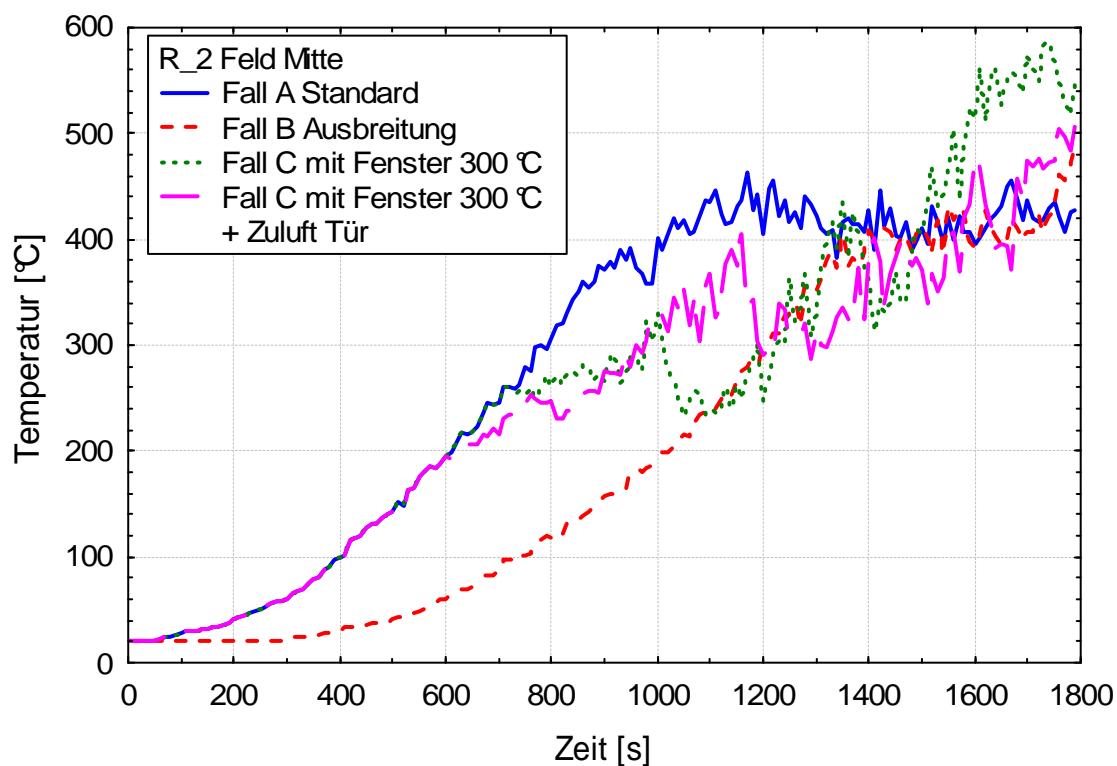


Bild A2.13 Verlauf der Temperatur am Riegel 2 in Feldmitte für 4 verschiedene Brandszenarien (siehe Tabelle A2.5)

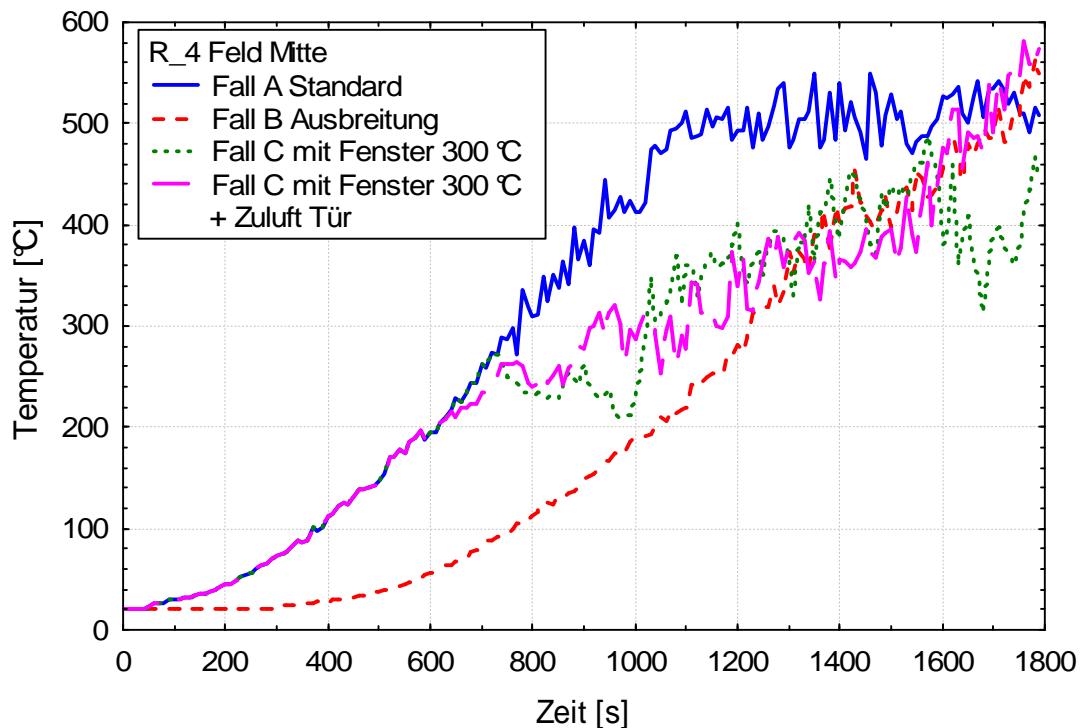


Bild A2.14 Verlauf der Temperatur am Riegel 4 in Feldmitte für 4 verschiedene Brandszenarien (siehe Tabelle A2.5)

Eine Analyse der Fälle C_50 „mit“ und „ohne“ Zuluft über eine untere Fluchttür führt zu unterschiedlichen Temperaturverteilungen unterhalb der Riegel (1 m unterhalb der Decke), wie sie in Bild A2.15 und Bild A2.16 dargestellt sind.

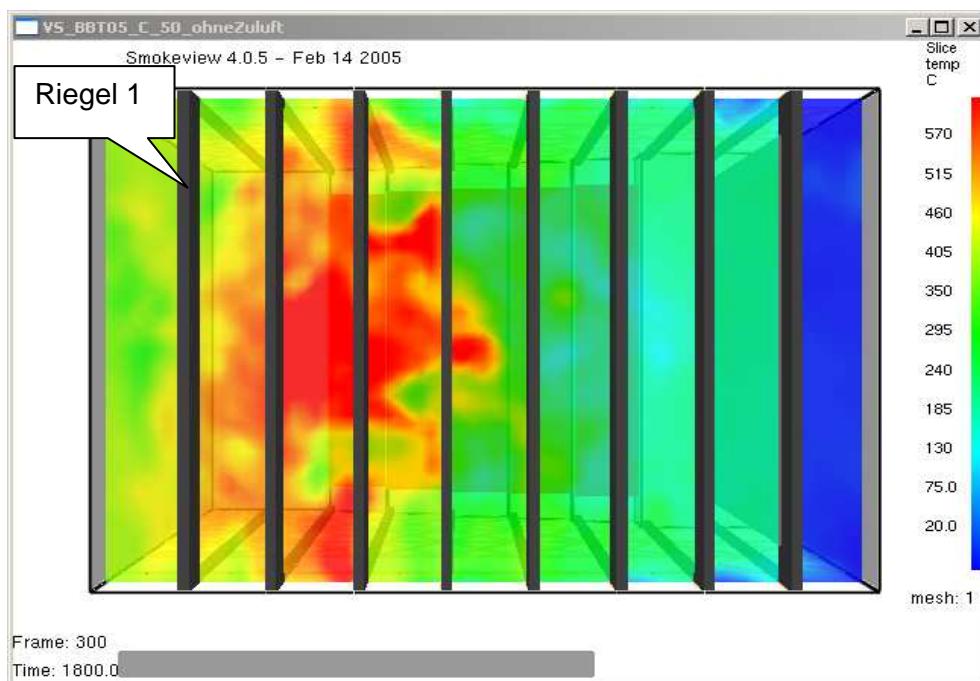


Bild A2.15 Temperaturverteilung im Bereich der Riegel für Fall C_50 (untere Fluchttüren geschlossen), Horizontalschnitt 1 m unterhalb der Decke, Zeit: 1.800. Sekunde

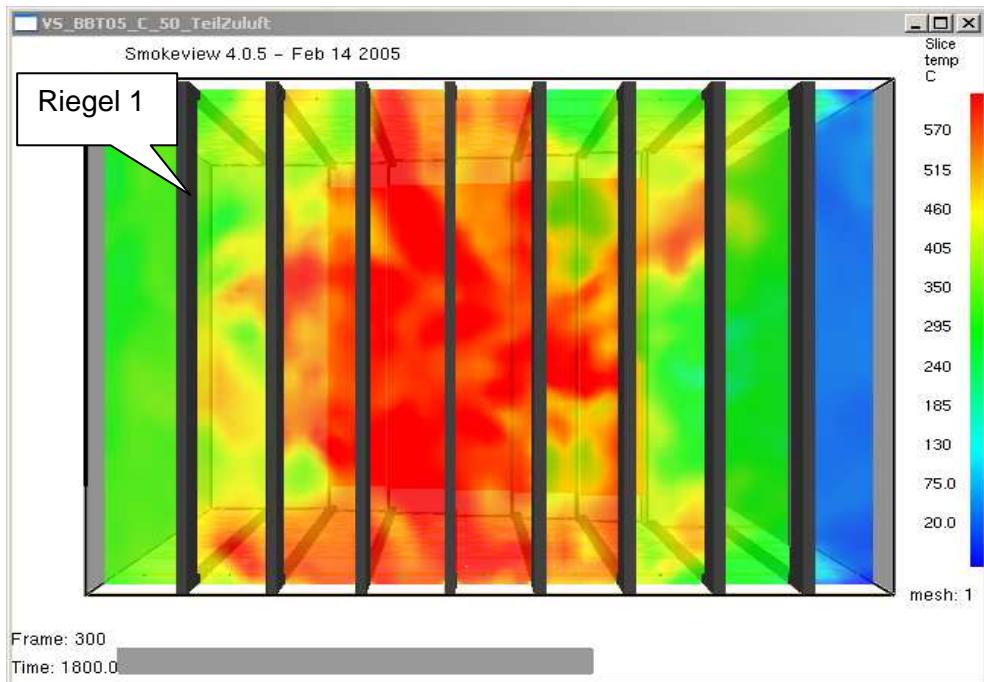


Bild A2.16 Temperaturverteilung im Bereich der Riegel für Fall C_50 (eine untere Fluchttür ab 10. Minute geöffnet), Horizontalschnitt 1 m unterhalb der Decke, Zeit: 1.800. Sekunde

Bleibt die untere Fluchttür geschlossen (Fall C_50), liegen die höchsten Temperaturen im Bereich der Binder 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.

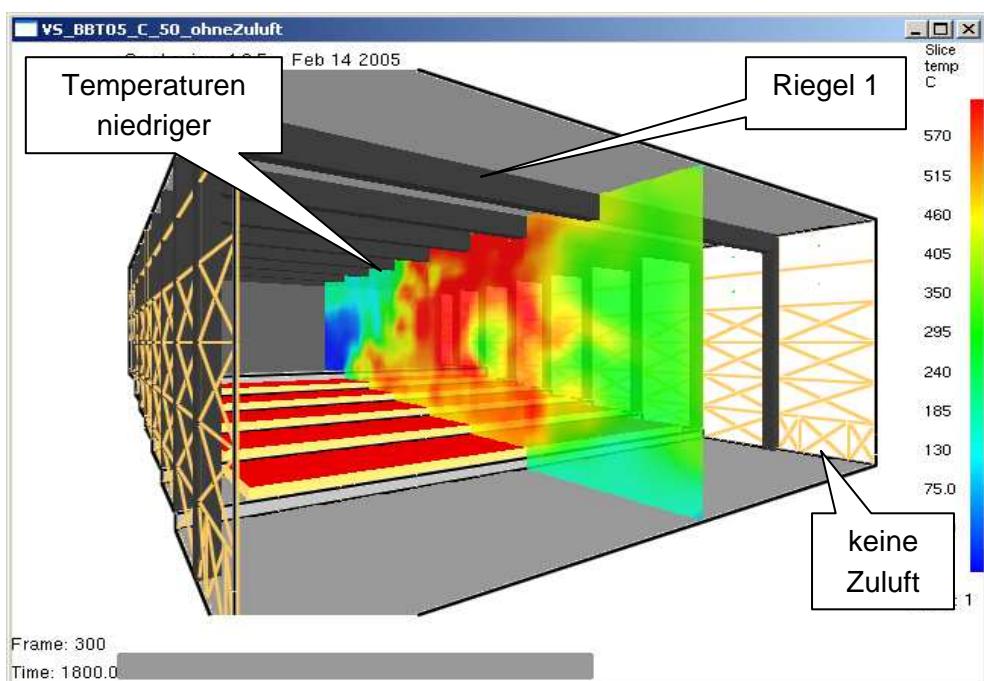


Bild A2.17 Temperaturverteilung im Bereich der Riegel für Fall C_50 (untere Fluchttüren geschlossen), Vertikalschnitt Längsachse, Zeit: 1.800. Sekunde

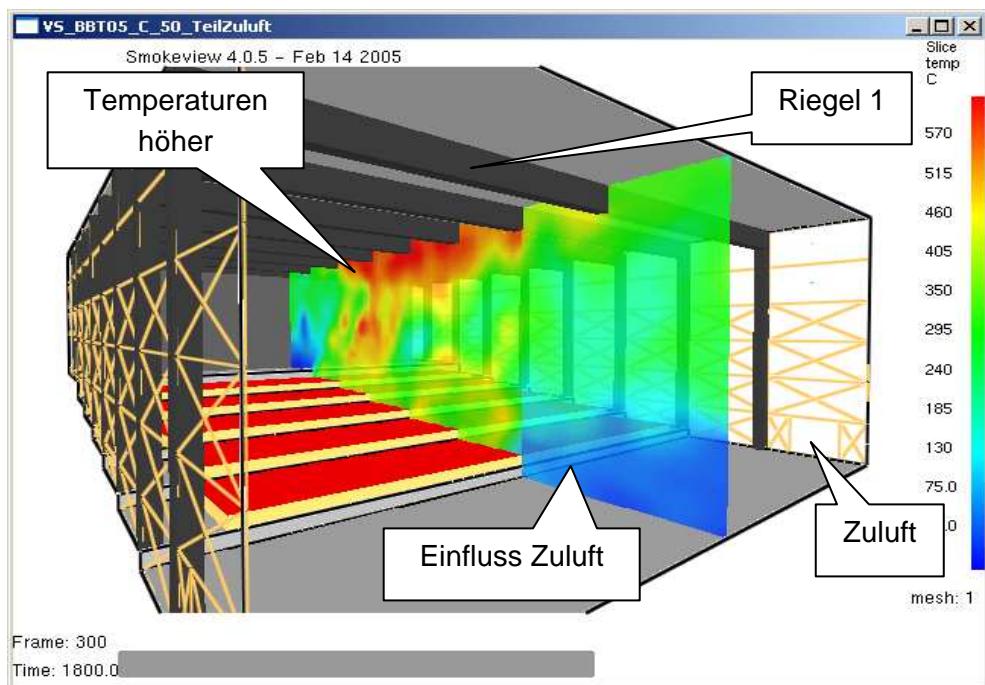


Bild A2.18 Temperaturverteilung im Bereich der Riegel für Fall C_50 (eine untere Fluchttür ab 10. Minute geöffnet), Vertikalschnitt Mittelachse, Zeit: 1.800. Sekunde

In jedem Fall führen die Zu- und Abluftöffnungen im Bereich der oberen Ebene des Hörsaals dazu, dass die im Bereich der oberen Sitzreihen verlaufenden Binder nicht automatisch die höheren Temperaturen erfahren. Der Einfluss der Zuluft über die seitliche Fluchttür ist auch in den Bildern A2.17 und A2.18 gut zu erkennen, in denen die Gastemperaturen entlang der Längsachse des Hörsaals dargestellt sind.

Im Bereich der Zuluftöffnung (siehe Bild A2.18) strömt kalte Luft in das Gebäude ein, was zu niedrigeren Temperaturen bis in den Bereich der Binder im unteren Bereich des Hörsaals führt. Die maximalen Temperaturen treten aber in beiden Varianten des Falles C im selben Bereich auf. Die Fallstudien zeigen, dass unterschiedliche Zuluftbedingungen zu unterschiedlichen Temperaturverteilungen führen und eine brandschutztechnische Auslegung nicht für einzelne Binder geführt werden sollte, sondern alle Binder gleichermaßen abdecken sollte.

Bild A2.19 vergleicht die Temperaturverläufe im Bereich des Riegel 3 unterhalb der Decke für die Varianten des Falles C (mit und ohne Zuluft über Fluchttür) für den Zeitraum zwischen der 25. und der 30. Minute. Im Fall C_50 (ohne Zuluft über Fluchttür) stellen sich die kritischen Temperaturen ein; in diesem Fall (durchgezogene Linie) werden praktisch über den gesamten Bereich der Simulation die höheren Temperaturen erreicht.

Bild A2.20 zeigt schließlich 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 850 °C berechnet. Die Temperaturen an den Stützen liegen über den gesamten betrachteten Zeitraum unterhalb der Werte, die in Feldmitte unterhalb der Decke berechnet wurden.

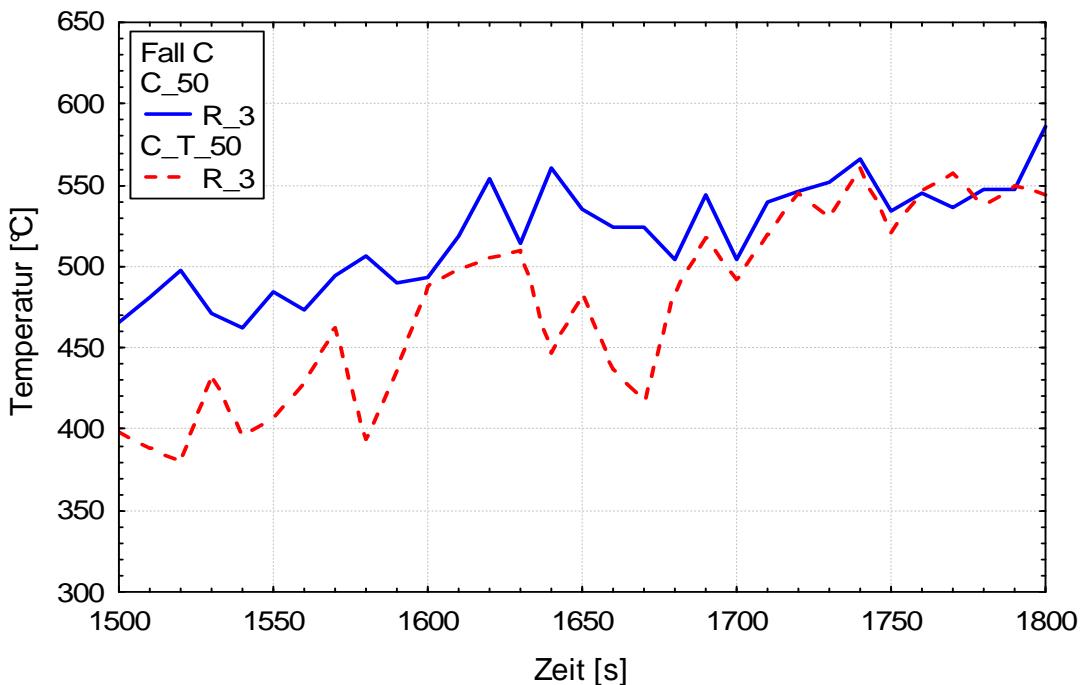


Bild A2.19 Temperaturverlauf am Riegel 3 (R_3) für die Fälle C_50 und C_50_T (siehe Tabelle A2.5), 1 m unterhalb der Decke, Mittelachse

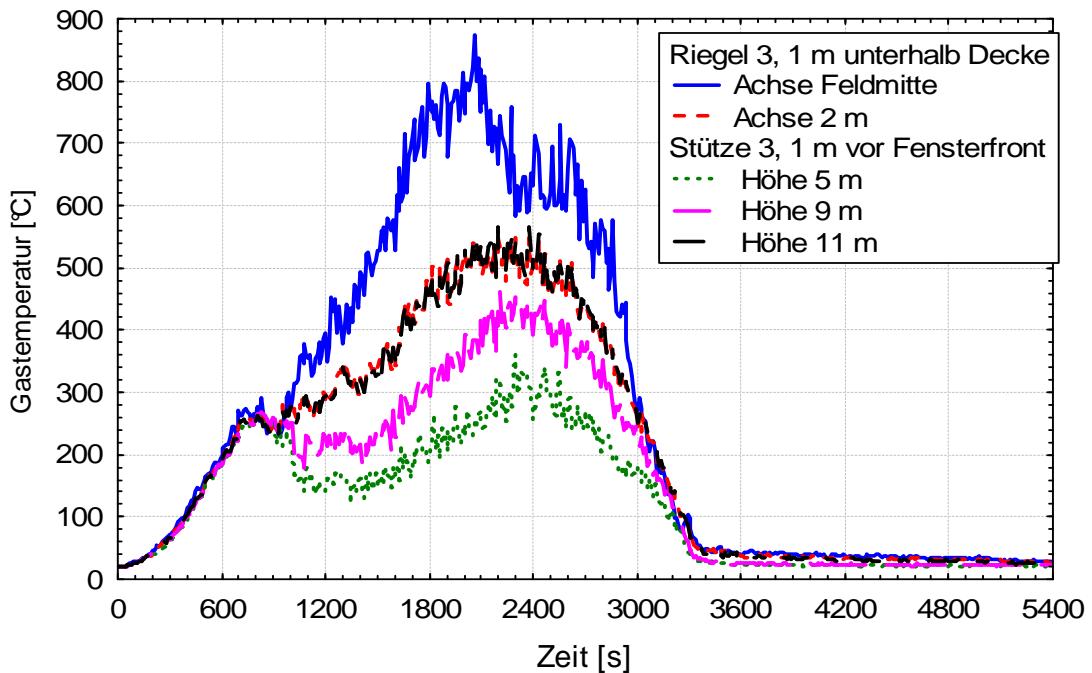


Bild A2.20 Temperaturverlauf am Riegel 3 und an den Stützen 3 an verschiedenen Messstellen (siehe Bild A2.11) für den Fall C_25, 1 m unterhalb der Decke, Mittelachse für 90 Minuten Berechnungszeit

Der Einfluss der zusätzlichen Zuluftflächen durch „herausfallende“ Fensterscheiben ab der 800. Sekunde ist deutlich zu erkennen, er führt zuerst zu einem Plateau bei der Temperatur-
vfdb TB 04-01(5/2009) Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes 347 / 386

entwicklung. Ab der 1.000. Sekunde steigen die Temperaturen aber wieder deutlich an, da zusätzlicher Sauerstoff zur Verfügung steht.

Die zur Beurteilung der Tragkonstruktion vorgegebene Energiefreisetzungsrat wird in der Simulation berücksichtigt und nicht durch den in FDS bestehenden „Suppression“-Algorithmus begrenzt. Dieser begrenzt die Abbrandrate, wenn die Sauerstoffkonzentration unter 15 Vol% und die Gastemperatur unterhalb einer bestimmten Grenze liegt, was zu einer niedrigeren umgesetzten Energiefreisetzungsrat führen würde, als in den Eingangsdaten für die Simulation vorgegeben wurde.

A2.4 Brandschutzbemessung der Konstruktion

A2.4.1 Tragwerk und Einwirkungen

Bei der Tragkonstruktion des Auditoriums handelt es sich um 10 Stahlrahmen mit den Abmessungen $b = 29,10 \text{ m}$ und $h = 12 \text{ m}$. 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. 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.

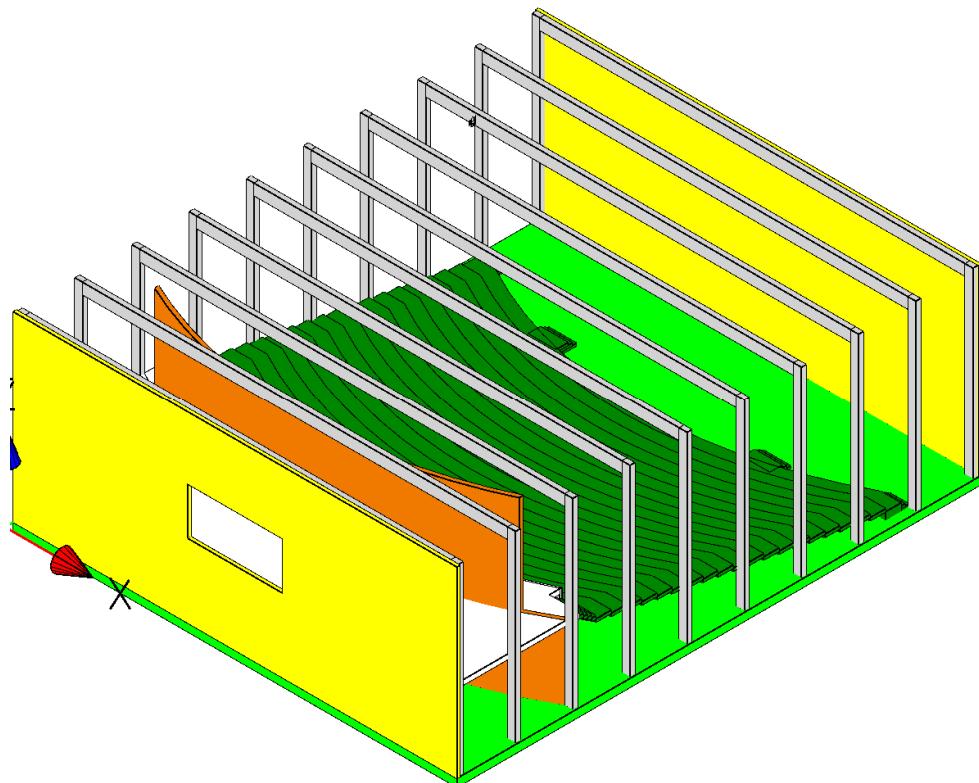


Bild A2.21 Tragkonstruktion des Auditoriums mit Stahlrahmen

22:16:17

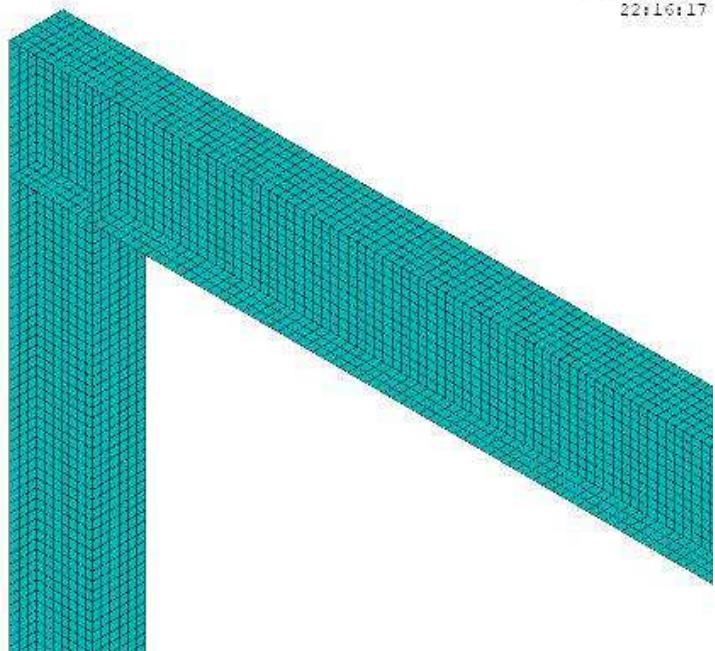


Bild A2.22 Eckausbildung der Stahlrahmens im Hörsaalgebäude

Zusammenstellung der Einwirkungen nach DIN V ENV 1991

Tabelle A2.6 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

$$\text{Linienlast infolge Eigengewicht: } 3,75 \text{ m} \times 0,59 \text{ kN/m}^2 = 2,21 \text{ kN/m}$$

$$\text{Eigengewicht Stahl-Glas-Fassade} \quad 1,88 \text{ kN/m}$$

$$\text{Schneelast} \quad 2,85 \text{ kN/m}$$

$$s = \mu_i \cdot C_a \cdot C_t \cdot s_k \cdot b = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,95 \text{ kN/m}^2 \cdot 3,75 \text{ m} =$$

Wind zugewandte Seite:

$$w_{e,zugew} = q_{ref} \cdot c_e(z) \cdot c_{pe} \cdot A = \frac{\sigma^2}{2} \cdot v_{ref}^2 \cdot c_e(z) \cdot c_{pe} \cdot A \quad 2,41 \text{ kN/m}$$

$$= \frac{1,25}{2} \cdot 27,6 \cdot 1,9 \cdot 0,71 \cdot 3,75 = 642,3 \text{ N/m}^2 \cdot 3,75 \text{ m} =$$

Wind abgewandte Seite:

$$w_{e,zugew} = q_{ref} \cdot c_e(z) \cdot c_{pe} \cdot A = \frac{\sigma^2}{2} \cdot v_{ref}^2 \cdot c_e(z) \cdot c_{pe} \cdot A \quad 1,02 \text{ kN/m}$$

$$= \frac{1,25}{2} \cdot 27,6 \cdot 1,9 \cdot (-0,3) \cdot 3,75 = -271,4 \text{ N/m}^2 \cdot 3,75 \text{ m} =$$

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

Lastfallkombination für die „kalte“ Bemessung: Grundkombination

$$E_d = E \left[\sum \gamma_{G,i} \cdot G_{ki} + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum \Psi_{0,j} \cdot \gamma_{Qi} \cdot Q_{ki} \right] \quad (\text{A2.31})$$

für Hochbauten darf auch ein vereinfachter Nachweis geführt werden nach

$$E_d = E \left[\sum \gamma_{G,i} \cdot G_{ki} + 1,35 \cdot \sum Q_{ki} \right] \quad (\text{A2.32})$$

Lastfallkombination für die „heiße“ Bemessung: Außergewöhnliche Situation

$$E_d = E \left[\sum \gamma_{GAi} \cdot G_{ki} + A_d + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k1} + \sum \Psi_{2,j} \cdot Q_{ki} \right] \quad (\text{A2.33})$$

Nach DIN V ENV 1991-1-1 [A2.15] sind folgende Teilsicherheitsbeiwerte sowie die Kombinationsbeiwerte nach Tabelle A2.7 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 A2.7 Kombinationsbeiwerte nach Tabelle 9.3 aus DIN V ENV 1991-1-1 [A2.15]

	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Nutzlasten in Versammlungsräumen	0,7	0,7	0,3
Schneelasten für Hochbauten	0,6	0,2	0,0
Windlasten für Hochbauten	0,6	0,5	0,0

Hinweis: Dieses Beispiel wurde noch nach DIN V ENV 1991-1-1 [A2.15] gerechnet. Für aktuelle rechnerische Nachweise gilt für die Ermittlung der Kombinationsbeiwerte DIN EN 1990 [A2.32].

Tabelle A2.8 Kombinationsbeiwerte nach Tabelle A.1.1 aus DIN EN 1990 [A2.32]

	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
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

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 Flanschaußenseite gegen Verschiebung quer zur Rahmenachse gehalten.

Für die Bemessung der Stahlrahmen wird als maßgebende Temperaturbeanspruchung der Verlauf mit den höchsten Brandraumtemperaturen ausgewählt (im Bild A2.23 mit Vollsymbolen markiert). Auf der sicheren Seite liegend werden diese Brandraumtemperaturen unverändert über die Höhe der Rahmenstiele und über die Länge des Rahmenriegels angesetzt. Dabei wird vernachlässigt, dass der untere Teil des Rahmenstiele teilweise durch die Tragkonstruktion für die Stuhlreihen vor dem direkten Brandangriff abgeschirmt wird.

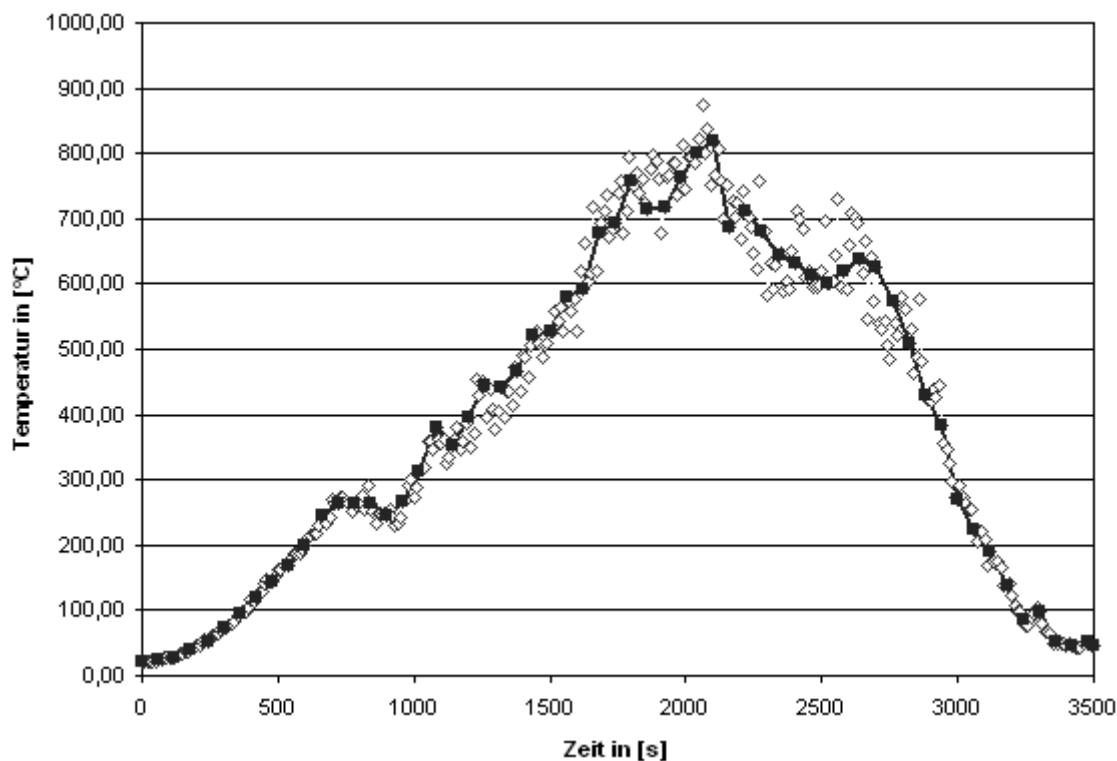


Bild A2.23 Zeitabhängige Temperatureinwirkung auf die Konstruktion im Riegel 3 (Feldmitte)

In Bild A2.23 sind die Brandraumtemperaturen für den Riegel 3 (Feldmitte) aus der CFD-Berechnung (Hohlsymbole) zu sehen. Da die Berechnung der Konstruktion in 60 s-Schritten erfolgt, werden auch die Brandraumtemperaturen nur im 60 s-Abstand der Bemessung zu Grunde gelegt (dunkle Kurve mit Vollsymbolen in Bild A2.23). Die Zwischenwerte finden keine Berücksichtigung. Dadurch wirkt die „Bemessungskurve“ gegenüber der Kurve aus der CFD-Berechnung erheblich glatter. Um durch die Vergrößerung der rechnerischen Zeitschritte keine Ungenauigkeiten zu erzeugen, wurde zur Absicherung diese Kurve mit einer mathematischen Trendlinie mit gleitendem Durchschnitt über 15 Perioden verglichen und eine gute Übereinstimmung festgestellt.

A2.4.2 Materialgesetze

Die Erwärmung eines Bauteils ist abhängig vom Wärmeübergang am Bauteilrand und der Wärmestrom im Bauteilinnern. Der durch ein Temperaturgefälle im Bauteil hervorgerufene Wärmestrom wird in seiner Geschwindigkeit von den temperatur- und werkstoffabhängigen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)], spezifische Wärme c_p [J/(kgK)] und Rohdichte ρ [kg/m³] beeinflusst. Als Wärmeübergangsbedingungen werden für die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der beflammteten Oberfläche $\alpha_c = 25$ W/(m²K) und an der brandabgekehrten Oberfläche $\alpha_c = 9$ W/(m²K) sowie ein resultierender Emissionsgrad von $\varepsilon_{res} = 0,72$ (bzw. $\varepsilon_{res} = 0,8$ [A2.32]) angenommen [A2.16].

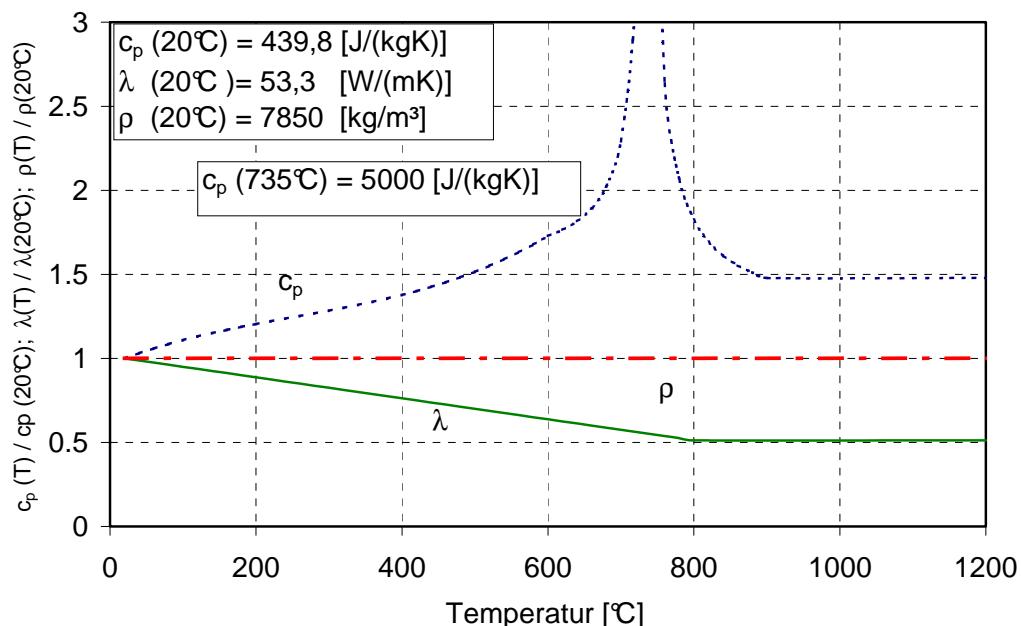


Bild A2.24 Temperaturabhängiger Verlauf thermischer Materialeigenschaften von Baustahl

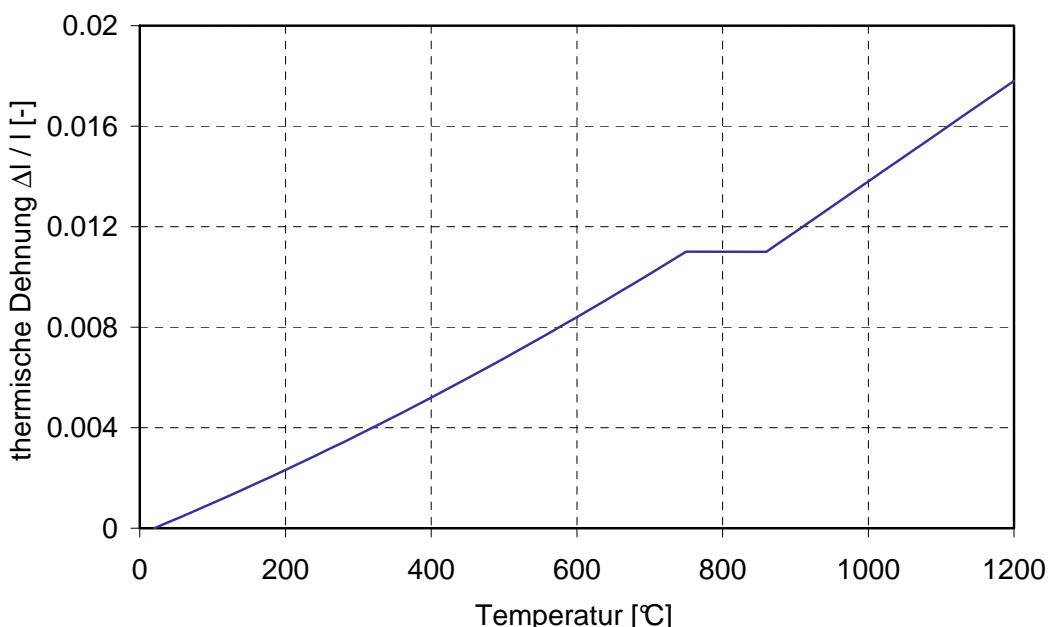


Bild A2.25 Thermische Dehnung von Baustahl

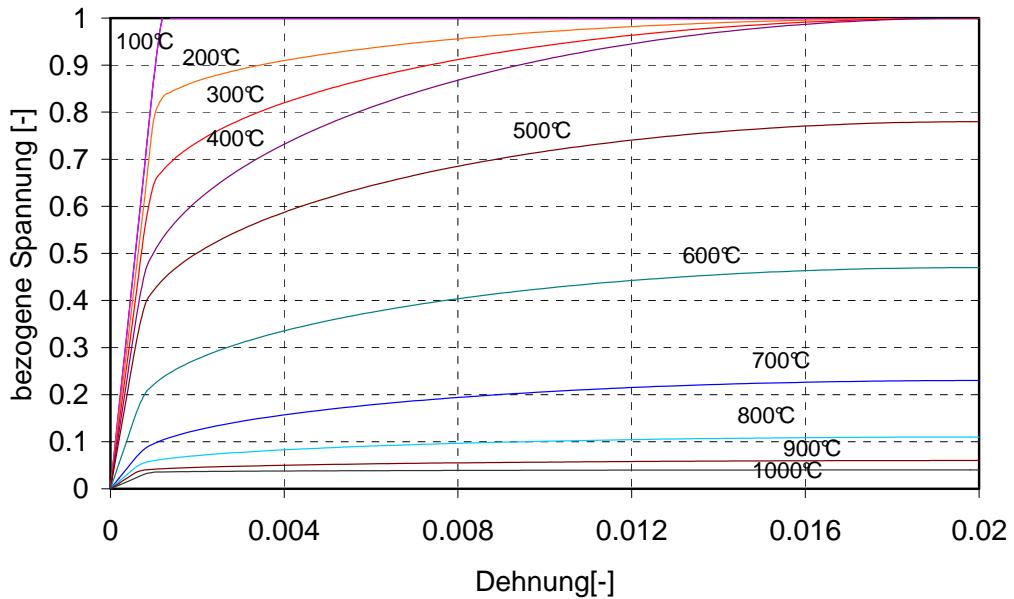


Bild A2.26 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Baustahl S235

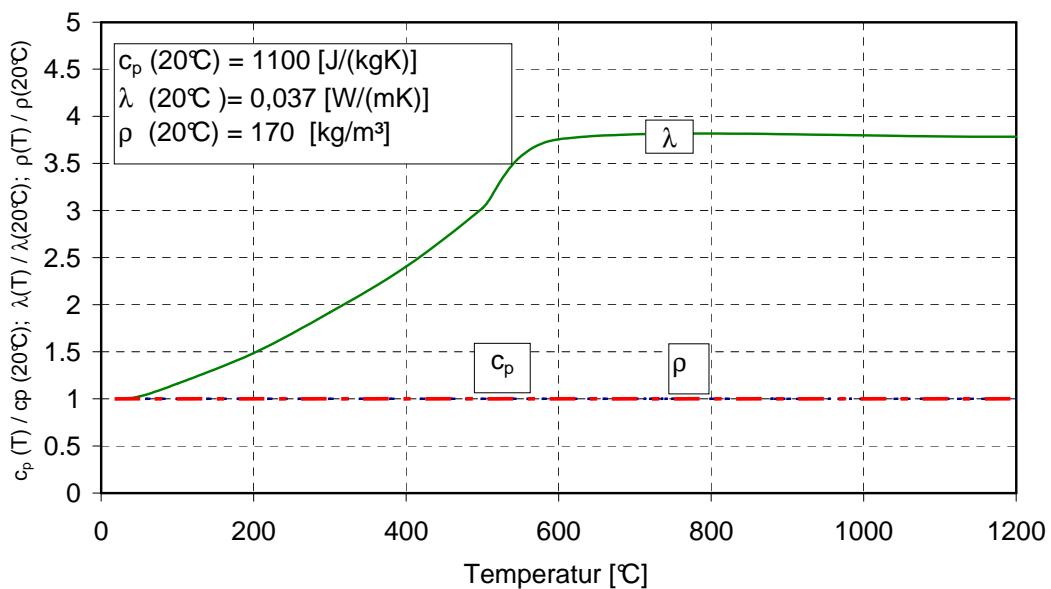


Bild A2.27 Temperaturabhängiger Verlauf thermischer Materialeigenschaften von Mineralwolle [A2.20]

Die temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften für Baustahl sind in Eurocode 3 Teil 1-2 [A2.18] als temperaturabhängige Rechenfunktionen angegeben. Bild A2.24 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf von Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifischer Wärme (c_p) und Rohdichte von Baustahl und Bild A2.25 den Verlauf der thermischen Dehnung nach Eurocode 3 [A2.18]. In Bild A2.26 sind temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Baustahl S235 nach [A2.18] Anhang A dargestellt. Bild A2.27 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf von Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifischer Wärme (c_p) und Rohdichte von Mineralwolle (ρ).

A2.4.3 Bemessung der Konstruktion mit Tabellen

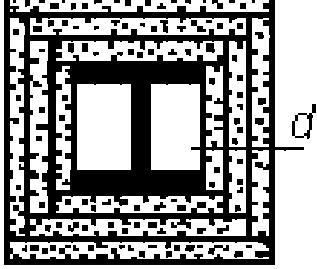
Im Eurocode 3 Teil 1-2 [A2.18] sind keine Tabellen für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen enthalten. Der tabellarische Nachweis nach DIN 4102 Teil 4 beruht auf dem Konzept der Bauteilauslegung nach Landesbauordnung bzw. den Sonderbauverordnungen. Er basiert auf Brandraumtemperaturen nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) und setzt die volle Lastausnutzung der Bauteile voraus. Das tabellarische Bemessungsverfahren der DIN 4102-4 bietet keine Möglichkeit, die Ergebnisse aus den Bemessungstabellen (z. B. Dicke der erforderlichen Bekleidung) auf einen von der ETK abweichenden Verlauf der Brandraumtemperaturen umzurechnen oder auf den vorhandenen Ausnutzungsgrad der Rahmenstiele und des Riegels anzupassen.

Die folgende Bemessung nach DIN 4102 Teil 4 soll das prinzipielle Vorgehen bei einer tabellarischen Bemessung zeigen. Die Ergebnisse dürfen nicht unmittelbar mit den später gezeigten Ergebnissen des vereinfachten und allgemeinen Rechenverfahrens verglichen werden. Die in der DIN 4102 Teil 4 [A2.19] angegebenen Werte gelten nur für Profile deren U/A-Wert kleiner als 300 m^{-1} ist. Für 3-seitige Beflammung ergibt sich damit

$$\text{HEA 500: } \frac{U}{A} = \frac{2,11 \text{ m}^2/\text{m} - 0,3 \text{ m}^2/\text{m}}{0,0198 \text{ m}^2} = 91,4 \text{ m}^{-1} \leq 300 \text{ m}^{-1} \quad (\text{A2.34})$$

$$\text{HEA 700: } \frac{U}{A} = \frac{2,50 \text{ m}^2/\text{m} - 0,3 \text{ m}^2/\text{m}}{0,0260 \text{ m}^2} = 84,6 \text{ m}^{-1} \leq 300 \text{ m}^{-1} \quad (\text{A2.35})$$

Tabelle A2.9 Tabelle 95 aus DIN 4102 Teil 4 [A2.19]

Konstruktionsmerkmale 	Feuerwiderstandsklasse-Benennung				
	F 30-A	F 60-A	F 90-A	F 120-A	F 180-A
	12,5 ¹⁾	12,5 + 9,5	3 x 15	4 x 15	5 x 15
¹⁾ Ersetzbar durch $\geq 18 \text{ mm}$ dicke Gipskarton-Bauplatten (GKB) nach DIN 18180.					

Nach Tabelle 95 in DIN 4102-4 [A2.19] müssen die Stützen des Rahmens für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten mit 12,5 mm dicken Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) nach DIN 18180 und für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten mit 3 Plattenlagen á 15 mm bekleidet werden.

Für biegebeanspruchte Bauteile sieht die DIN 4102-4 in Tabelle 92 die Bekleidung mit Gipskarton-Feuerschutzplatten vor. Deren Anwendung setzt jedoch voraus, dass sich oberhalb des zu bekleidenden Bauteils eine nach Norm klassifizierte Stahlbetondecke befindet. Das

ist bei dem hier vorliegenden Hörsaal-Gebäude nicht der Fall. Dadurch darf die Tabelle 92 nicht angewendet werden.

Alternativ zur brandschutztechnischen Bemessung nach DIN 4102-4 können Bekleidungen oder Beschichtungen nach den Zulassungen der Hersteller verwendet werden.

A2.4.4 Bemessung der Konstruktion mit dem vereinfachten Rechenverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2

Das vereinfachte Rechenverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2, Abschnitt 4.2.4 [A2.18] erlaubt die Bestimmung der kritischen Temperatur in Abhängigkeit der Bauteilauslastung μ_0 mit Gleichung (6.1). Die Ausnutzung der Rahmen $\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$ beträgt für die Stiele 0,57 und für den Riegel 0,59. Damit ergeben sich die kritischen Stahltemperaturen für die Stiele zu 563 °C und für die Riegel zu 557 °C.

Zur Ermittlung der Bauteiltemperatur bietet der Eurocode 3 Teil 1-2, 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.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t \quad (\text{A2.36})$$

Dabei ist:

$h_{net,d}$ der flächenbezogene Bemessungswert des Nettowärmestroms

A_m/V der Profilkfaktor 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 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 Abschnitt 3.3.1.2 nach den Gleichungen (A2.37) bis (A2.40) berechnet wird. Die Stahltemperatur θ_a wird in °C angegeben.

für 20 °C ≤ θ_a < 600 °C

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3 \quad [\text{J/kgK}] \quad (\text{A2.37})$$

für 600 °C ≤ θ_a < 735 °C

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [\text{J/kgK}] \quad (\text{A2.38})$$

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

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

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ [J/kgK]} \quad (\text{A2.39})$$

für $900 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1.200 \text{ }^\circ\text{C}$

$$c_a = 650 \text{ [J/kgK]} \quad (\text{A2.40})$$

Der Netto-Wärmestrom $h_{\text{net},d}$ auf der brandbeanspruchten Oberfläche kann nach der DIN EN 1991-1-2 unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung nach Gleichung (6.8) berechnet werden. Der konvektive Anteil des Netto-Wärmestroms ergibt sich dabei aus Gleichung (6.7), der Netto-Wärmestrom durch Strahlung aus Gleichung (6.6), wobei $\varepsilon_m = 0,625$ und $\varepsilon_f = 0,8$ [A2.18] sowie $\phi = 1,0$ gewählt wurde.

Hinweis: Dieses Beispiel wurde noch nach DIN V ENV 1991-1-1 [A2.15] gerechnet. Für aktuelle rechnerische Nachweise gilt für die Ermittlung der Netto-Wärmestromdichte DIN EN 1990 [A2.32], d. h. insbesondere $\varepsilon_m = 0,7$ und $\varepsilon_f = 1,0$.

Die Berechnung der Bauteiltemperatur nach Gleichung (A2.36) 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; im Eurocode 3 Teil 1-2 [A2.18] 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 vorangegangenen Rechenschritt eingesetzt und dafür die Temperaturdifferenz $\Delta\theta_{a,t}$ nach Gleichung (A2.36) berechnet.

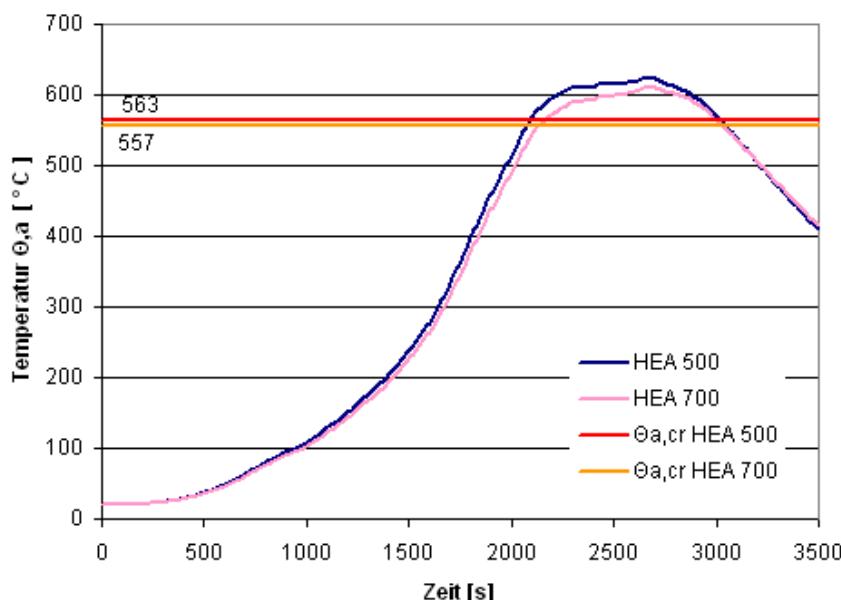


Bild A2.28 Temperaturzeitverlauf im Rahmenriegel (HEA 700) und in den Rahmenstielchen (HEA 500) nach dem vereinfachten Rechenverfahren für die Rahmenbauteile nach EC 3-1-2

Das Ergebnis des vereinfachten Rechenverfahrens ist in Bild A2.28 dargestellt. Verglichen werden die Bauteiltemperaturen in den Querschnitten der Rahmenstiele und des Rahmenriegels mit den nach Gleichung (6.1) ermittelten kritischen Temperaturen. Es ist deutlich zu sehen, dass die Bauteiltemperatur im Riegel und in den Stielen die kritische Stahltemperatur übersteigt. Somit kann der Stahlrahmen nach der Nachweismethode des vereinfachten Rechenverfahrens nicht ungeschützt ausgeführt werden.

A2.4.5 Bemessung der Konstruktion mit dem allgemeinen Rechenverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2

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. Vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend wird angenommen, dass die für die Riegelmitte berechneten maximalen Heißgastemperaturen auf den gesamten Rahmen einwirken. 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. Für das FE-Modell wurde ein Ausschnitt aus dem Rahmenriegel mit dem daraufliegenden Dachpaneel gewählt. Die Berücksichtigung des Dachpaneeles ist wichtig, um das Abfließen der Wärme nach oben bzw. nach außen zu behindern. Das Riegelprofil wird von drei Seiten mit Temperatur beaufschlagt. Da eine 2-D-Temperaturberechnung auch auf einem durchschnittlichen PC (P4-Mobile, 1,5 GHz, 512 MB Arbeitsspeicher) nur wenige Minuten dauert, kann die Elementierung fast beliebig fein gewählt werden.

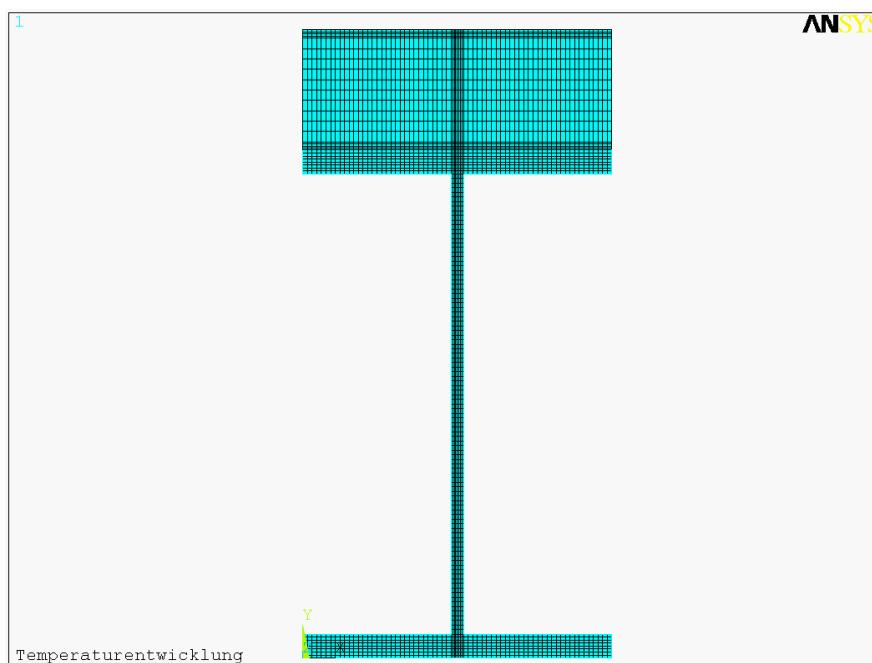


Bild A2.29 FE-Modell für die Temperaturberechnung des Rahmenriegels

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. 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 zeigen, dass eine Maximaltemperatur von 717 °C erreicht wird. Diese Temperatur ist deutlich höher, als die mit dem vereinfachten Rechenverfahren ermittelte Bauteiltemperatur. Das resultiert daraus, dass im vereinfachten Rechenverfahren die hohe Wärmedämmwirkung durch die Paneele nur unzureichend berücksichtigt werden kann.

Wie in Bild A2.30 dargestellt ist, erwärmt sich der Steg des Profils auf Grund der geringen Dicke am stärksten. Während der Abkühlphase wandert die Wärme noch weiter in die Paneele hinein und die Flansche bleiben durch ihre Massigkeit wärmer als der Steg, der schnell abkühlt.

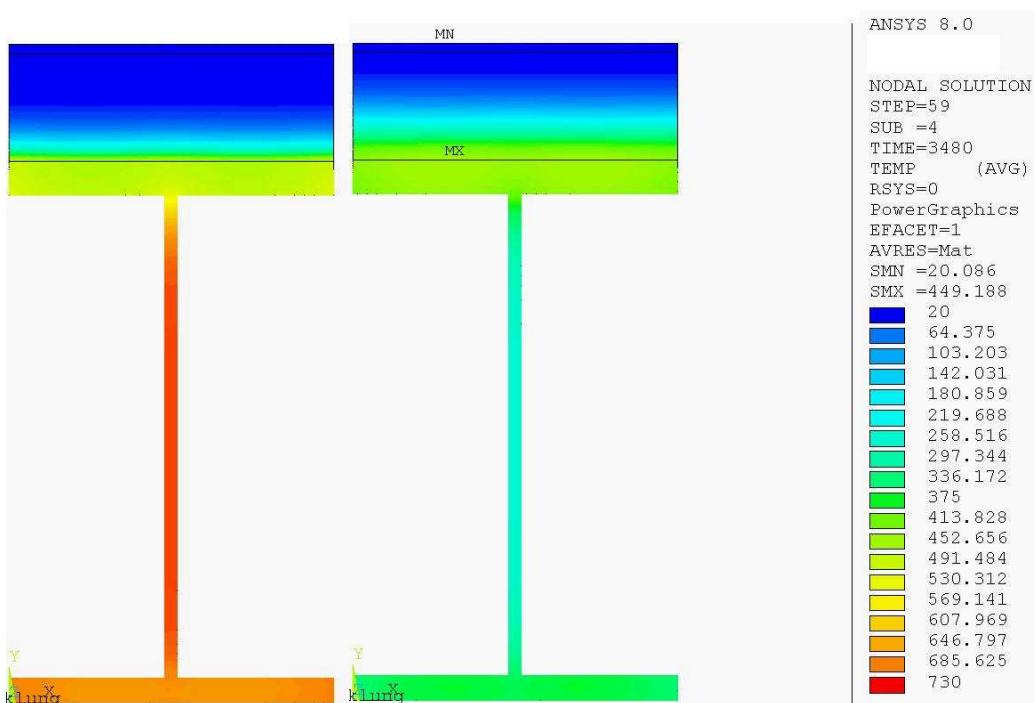


Bild A2.30 Durchwärmung des Rahmenstiels HEA 500, links beim Temperaturmaximum nach 2.220 s, rechts am Ende der Wärmefreisetzung nach 3.480 s

Die Erwärmung des Stützenprofils im Steg wird in Bild A2.31 dargestellt. Das Temperaturmaximum im Steg wird ungefähr zur gleichen Zeit nach 2.220 s erreicht, zu der auch die Brandraumtemperatur ihr Maximum hat (vgl. Bild A2.23).

Tragwerksanalyse

Als Einwirkung für die Tragwerksanalyse wird die maximale Temperatur im Steg für das gesamte Bauteil angenommen. Die Temperaturen für die Profile HEA 500 und HEA 700 differieren nur unwesentlich. 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.

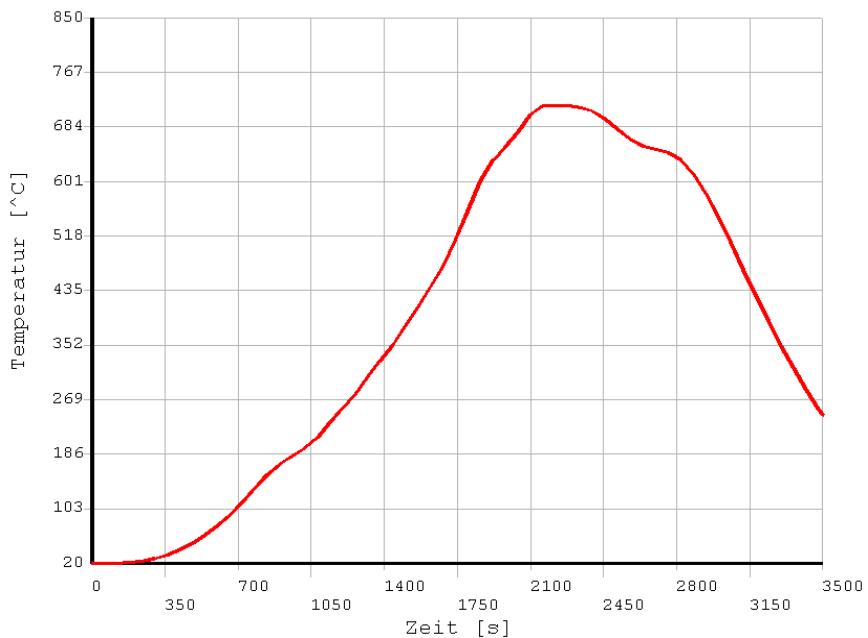


Bild A2.31 Temperaturverlauf im Steg des Rahmenstiels

Die Rahmenecken sind an ihrem höchsten, äußeren Punkt und der Obergurt des Riegels in Rahmenmitte jeweils quer zur Rahmenachse (in z-Richtung) gehalten. Die Elementgrößen betragen ca. 5 cm.

Die Versagensbedingungen sind bei Anwendung eines allgemeinen Rechenverfahrens ingeniermäßig 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.

Bei der Festlegung der maximal zulässigen Verformung muss die raumabschließende Funktion der Bauteile berücksichtigt werden. Die Decke besteht aus Sandwichelementen, die große Verformungen tolerieren. Da die 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, so dass für diesen Schadensfall auch keine Grenze gesetzt werden muss.

Die maximale Durchbiegung des Rahmenriegels wird auf l/20 festgelegt. Bei einer Systemlänge von 28,30 m entspricht dies einer Durchbiegung von 1,45 m. Diese Verformung kann von den Sandwichelementen und den Befestigungsmitteln gerade noch aufgenommen werden, vor allem da sich die nebenstehenden Stahlrahmen des Gebäudes ebenfalls verformen.

Für das Versagenskriterium der Durchbiegungsgeschwindigkeit wird das Ryan-Robertson-Kriterium gewählt, das auch in der DIN 4102-Teil 2 für statisch bestimmt gelagerte, ganz oder vorwiegend durch Biegung beanspruchte Bauteile vorgesehen ist. Es legt eine kritische Durchbiegungsgeschwindigkeit nach Gleichung (A2.41) fest

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{l^2}{9.000 \cdot h} \quad (\text{A2.41})$$

mit:

- Δf Durchbiegungsintervall [cm] während eines Zeitintervalls Δt von 1 min
- Δt Zeitintervall von einer Minute
- l Stützweite des Bauteils [cm]
- h Statische Höhe des Bauteils [cm]

Die maximale Formänderung tritt zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur auf. In Feldmitte beträgt die Größte Differenz der Verschiebungen in y-Richtung zwischen zwei Zeitschritten von 60 s, wie in Bild A2.36 zu sehen $\Delta s = 8,32$ cm.

$$\frac{8,32 \text{ cm}}{2,830 \text{ cm}} = 2,94 \cdot 10^{-3} < \frac{2,830^2}{9.000 \cdot 700} = 1,27 \quad \text{Bedingung erfüllt!}$$

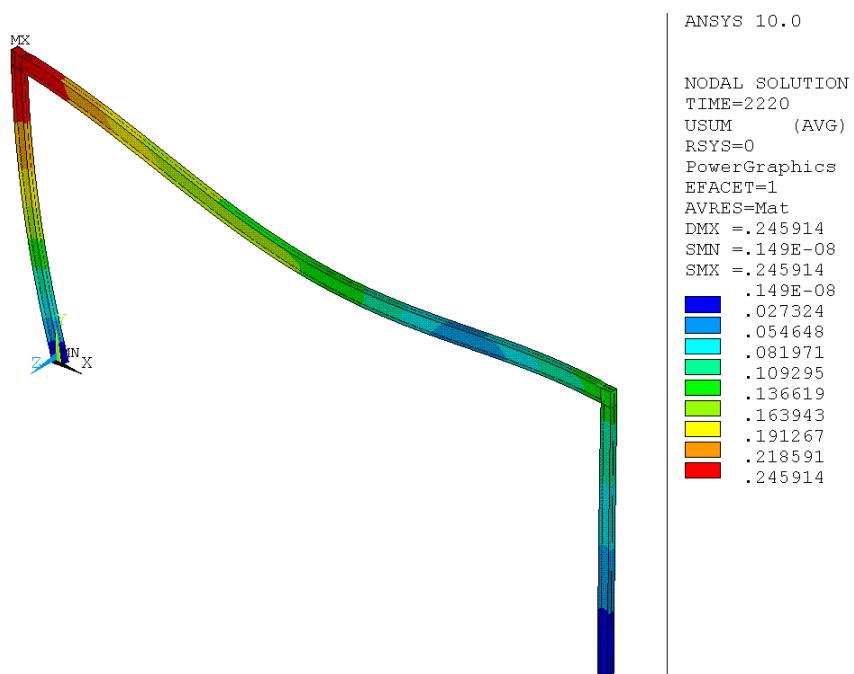


Bild A2.32 Gesamtverformung des Rahmens mit 10-facher Überhöhung. Die Skala zeigt die summierten Verformungen der Knoten in alle Richtungen

Die Ergebnisse der Tragwerksanalyse zeigen, dass es auf Grund der hohen Temperaturen und den Abmessungen der Bauteile – insbesondere der Länge des Rahmenriegels – zu großen thermischen Verformungen kommt (Bild A2.32). Diese wirken teilweise den Einflüssen aus Eigengewicht und äußeren Einwirkungen entgegen.

Im Bereich der Rahmenecke und im unteren, brandbeanspruchten Flansch des Rahmenriegels treten plastische Dehnungen auf (Bild A2.33). Dies macht deutlich, dass mit Hilfe der genauen rechnerischen Analyse die Tragfähigkeit bis in den Bereich großer Verformungen erfasst wird. Bei Anwendung des allgemeinen Rechenverfahrens nach der FE-Methode können Tragwerksreserven mobilisiert werden, die weder beim tabellarischen Nachweis noch beim vereinfachten Rechenverfahren berücksichtigt werden können.

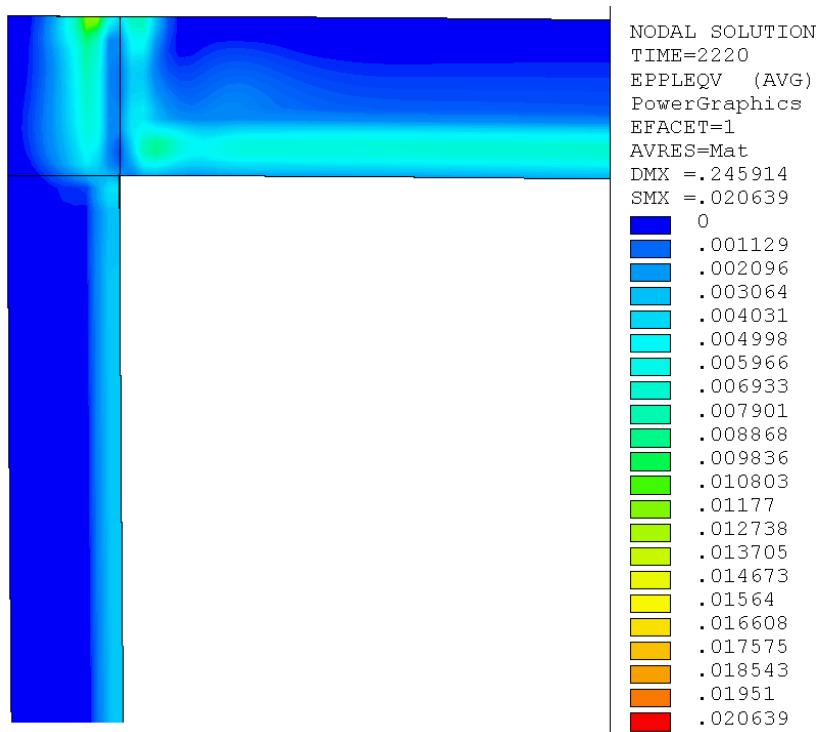


Bild A2.33 Plastische Dehnungen

Aufgrund der Erwärmung des Rahmens kommt es zu einer starken Verlängerung des Rahmenriegels. Dadurch bewegen sich die Rahmenecken auseinander. Diese Verschiebung sind auf der windzugewandten Seite des Rahmens so groß, dass die Verschiebung infolge Windeinwirkung aufgehoben und nach ca. 700 s der Rahmenknotens in entgegengesetzter Richtung verschoben wird.

In Bild A2.34 wird die Verschiebung des oberen, äußeren Knoten in der Rahmenachse gezeigt. Zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums nach 2.220 s hat er sich am weitesten aus seiner Ausgangslage entfernt. Dies trifft auch auf die vertikale Verschiebung des Knoten zu, die in Bild A2.35 dargestellt ist. Vergleicht man Bild A2.31 und Bild A2.35 so stellt man fest, dass die Form der Kurve für die vertikale Verschiebung der Rahmenecke in Folge thermischer Dehnung gut mit der Form der Temperaturkurve übereinstimmt.

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

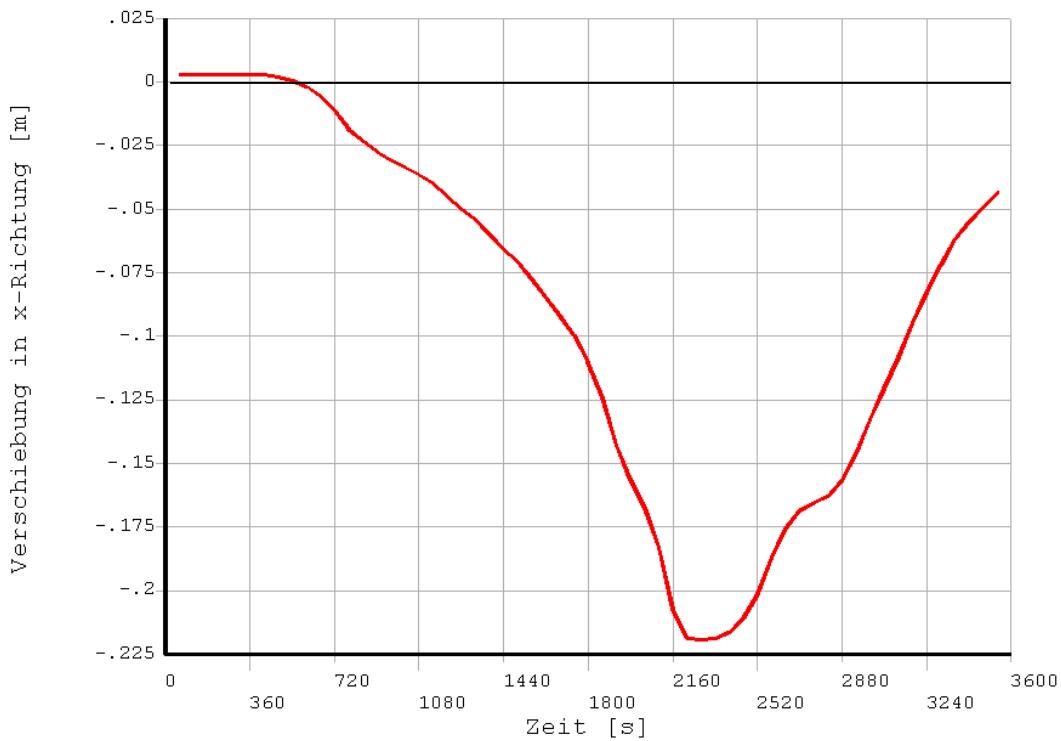


Bild A2.34 Horizontale Verschiebung des oberen äußeren Knotens der linken (windzugewandten) Rahmenecke

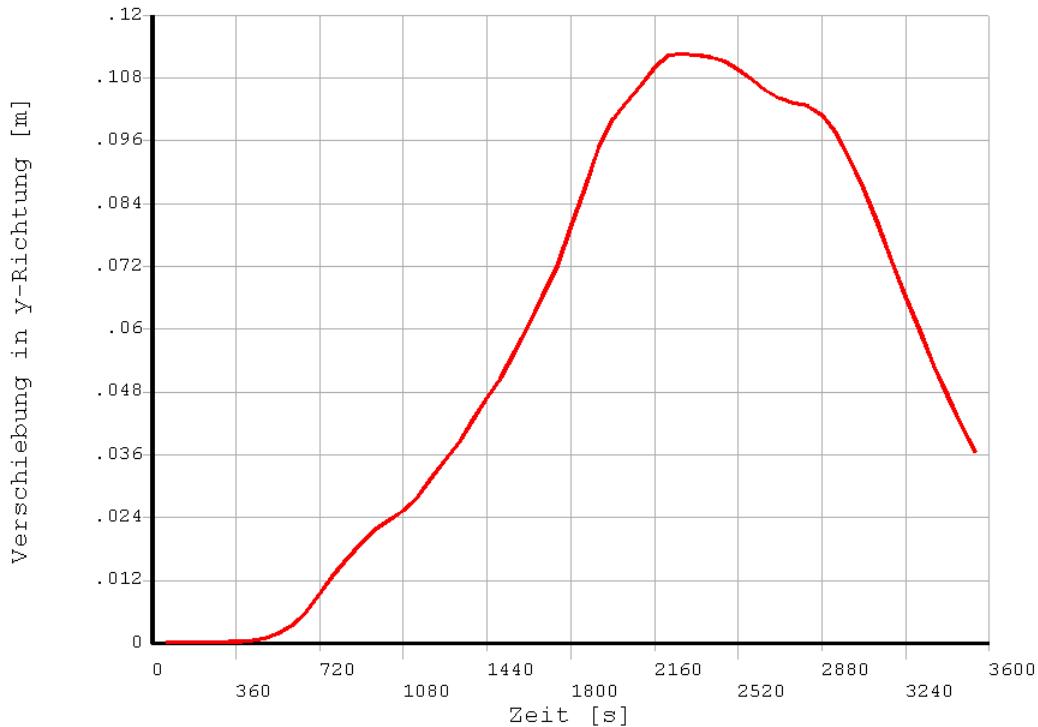


Bild A2.35 Vertikale Verschiebung des äußeren, oberen Knoten in der linken Rahmenecke

Betrachtet man die vertikale Verschiebung des Untergurtes des Rahmenriegels in Feldmitte in Bild A2.36, so ist zunächst die Durchbiegung aus den Gebrauchslasten 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 A2.36 und Bild A2.35 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 A2.36 und Bild A2.35 entspricht der Durchbiegung des Rahmenriegels. Im gesamten Brandverlauf bleibt die Unterseite des Rahmenriegels unterhalb der Auflagerpunkte an den Stützen. Das bedeutet, dass keine Durchbiegung nach oben erfolgt.

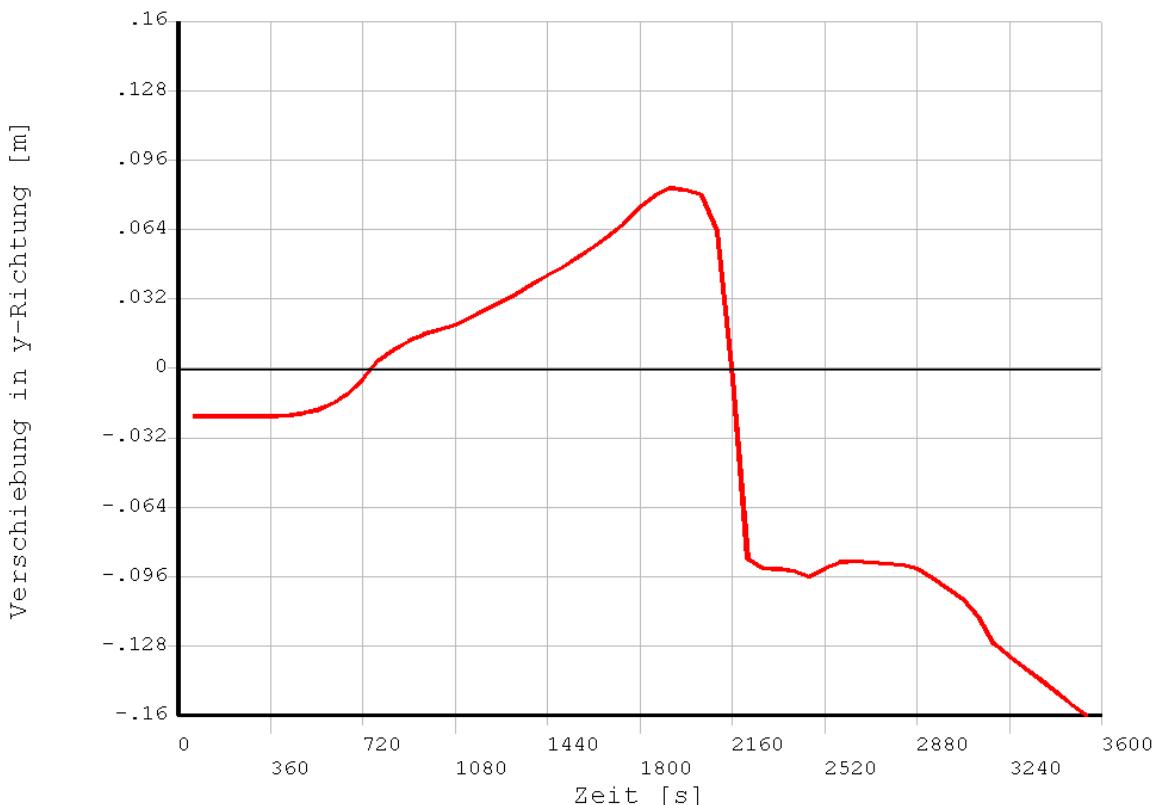


Bild A2.36 Vertikale Verschiebung des Untergurtes des Rahmenriegels in Feldmitte

A2.5 Nachweise der Personensicherheit

Das Hörsaalgebäude besitzt 20 Sitzreihen zu je 32 Plätzen, so dass 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 ($t_{Räumung}$) wesentlich kleiner ist, als die Zeitspanne ($t_{verfügbar}$) bis zum Eintritt signifikanter Belastungen durch die Rauch- und Wärmeausbreitung. Weiterhin ist sicherzustellen, dass die sonstigen Bedingungen des Entfluchtungsvorgangs 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 ent-

sprechen, wird an dieser Stelle das durch die MVStättV erreichte Sicherheitsniveau mit den vorgegebenen Brandszenarien und mit Hilfe von Ingenieurmethoden bestimmt.

A2.5.1 Kriterien zum Nachweis der Schutzzielerfüllung

Für die zu untersuchenden Brandszenarien erweisen sich die Kriterien „Höhe der raucharmen Schicht“, „Erkennungsweite“ sowie die „Fractional Effective Dose“ (FED) relevant (Tabelle A2.10). Als Beurteilungswert für die raucharme Schicht wird 2,50 m über dem Boden angesetzt. Zur Bestimmung dieser Grenzschicht wird z. B. der Temperaturverlauf über die Höhe ausgewertet, wobei verschiedene Auswertemethoden zu geringfügig unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Der Zusammenhang zwischen der Erkennungsweite S, dem empirischen Faktor C, dem massespezifischen Extinktionskoeffizienten K_m und der Rußmassenkonzentration Y_s lautet

$$S = \frac{C}{K_m \cdot Y_s} \quad (\text{A2.42})$$

Für Licht reflektierende Körper wurde C = 3 gesetzt. Der Koeffizient K_m für Ruß aus der Verbrennung von Holz unter Flammenbildung wurde mit 7.600 m²/kg angenommen [A2.5]. Durch eine konservativ anzunehmende Rußausbeute werden auch konservative Ergebnisse zur Erkennungsweite berechnet. Auf Grund des übersichtlichen Aufbaus des Hörsaals wird 10 m als Beurteilungswert verwendet. Die Erkennungsweite ist ortsbezogen und wird in 2 m Höhe bestimmt.

Tabelle A2.10 Ausgewählte Kriterien zum Nachweis der Schutzzielerfüllung

Messgröße	Beurteilungswert	Bemerkung
raucharme Schichthöhe	2,5 m	nach [A2.4]
Erkennungsweite	10 m	nach Kap. 8, Tab. 8.2 10 m bis 20 m
Fractional Effective Dose (FED)	0,1	0,1 - 0,3 nach [A2.6]

Der 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, HCN, CO₂ und O₂-Mangel betrachtet. Bei Verwendung des FED sollte in jedem Fall die Primärliteratur, wie Purser [A2.7], hinzugezogen werden, in der z. B. auch eine Erweiterung des FED zur Berücksichtigung von Reizgasen vorgeschlagen wird. Der FED ist als dimensionslose Zahl definiert, die den Wert Eins erreicht, wenn die Schadwirkungen des Brandrauchs bei Personen Fluchtunfähigkeit hervorrufen. Da verschiedene Bevölkerungsgruppen aber sensibler reagieren, sollte ein FED von 0,1 bis 0,3 als Maß für die Fluchtun-

fähigkeit verwendet werden [A2.6, A2.7]. Da zeit- und ortsabhängige Gaskonzentrationen von CFD-Modellen (Feldmodellen) berechnet werden, bietet sich prinzipiell die Kopplung der FED-Berechnung mit den CFD-Ausgabedaten an.

A2.5.2 Brandszenarien und Simulation

A2.5.2.1 Brand im Hörsaal

Es wird angenommen, dass sich der in A2.2 beschriebene Brandverlauf im Hörsaal einstellt. Die Wärmefreisetzung-Zeitkurve in dem Personenschutzaspekte abdeckenden Zeitraum lässt sich durch die Gleichung

$$\dot{Q}(t) = 0,046890 \frac{\text{kW}}{\text{s}^2} \cdot t^2 \quad (\text{A2.43})$$

ausdrücken (vgl. Kapitel A2.2). Der Brand würde im unteren Bereich der Sitzreihen in der Nähe der Notausgänge ausbrechen und sich mit einer Geschwindigkeit von 0,5 m/min ausbreiten. Der Entstehungsort ist konservativ gewählt, da durch die Mittellage die Brandausbreitung in alle Richtungen erfolgen kann und durch die vertikale Lage über die Höhe maximale Plumemassenströme auftreten.

Um lokale Informationen über die Atmosphäre im Brandraum zu erhalten, wurde das Brandszenario im Hörsaal mit dem CFD-Modell Fire Dynamics Simulator (FDS, Version 4) [A2.5] simuliert. Die Diskretisierung des Gebäudes erfolgte dabei mit einem Knotenabstand von 25 cm entsprechend den Überlegungen in A2.3. Ergänzend wurden im Hörsaalgebäude lokale Simulationsergebnisse zu Heiß- und Kaltgasschichttemperaturen, Höhe der raucharmen Schicht, Gaskonzentrationen und zur Erkennungsweite aufgezeichnet. Die Messpunkte befanden sich in einem Abstand von 1 m zu den Längsseiten gegenüberliegend auf Höhe der Notausgänge, auf halbem Wege der Stufengänge sowie 3 m vor und 0,50 m hinter der Wandscheibe (Bild A2.37). Gaskonzentrationen und Erkennungsweiten wurden in 2 m Höhe aufgenommen. Entsprechend den angenommenen Brandlasten wurde mit dem Verbrennungsmodell für Holz mit einem effektiven Heizwert von 11.429 kJ/kg und einer Ausbeute von Ruß und Kohlenmonoxid (CO) von je 0,1 g/g gerechnet. Für die akute Toxizität ist neben CO ebenfalls Cyanwasserstoff (HCN, Blausäuregas) von hoher Bedeutung. HCN kann in der Simulation als Gaskomponente nicht berücksichtigt werden; stattdessen wird in der Auswertung die HCN-Ausbeute und damit auch die Konzentration an das Auftreten anderer Verbrennungsgase gekoppelt. Einem Vorschlag von Purser [A2.6] für Brandlasten mit geringem (< 2 %) Stickstoffgehalt folgend, wird die Ausbeute mit 0,002 g/g angesetzt. Diese Schadstoffausbeuten sind für einen gut ventilirten Brand mit Holz als maßgeblicher Brandlast konservativ. Für bestimmte Brandlasten mit signifikanten Anteilen an Heteroatomen (z. B. Chlor in PVC, Stickstoff in Wolle oder Schwefel in Gummi) oder besonders hoher Rußausbeute (z. B. Polystyrol) sind allerdings zusätzliche Schadgase bzw. höhere Ausbeuten unbedingt zu berücksichtigen (vgl. z. B. [A2.6, A2.7, A2.8]). Das Hörsaalgebäude verfügt beidseitig vor und hinter der Wandscheibe über vier je 8 m² große RWA-Öffnungen (rechnerisch 3,4 % der Grundfläche) (Bild A2.37).

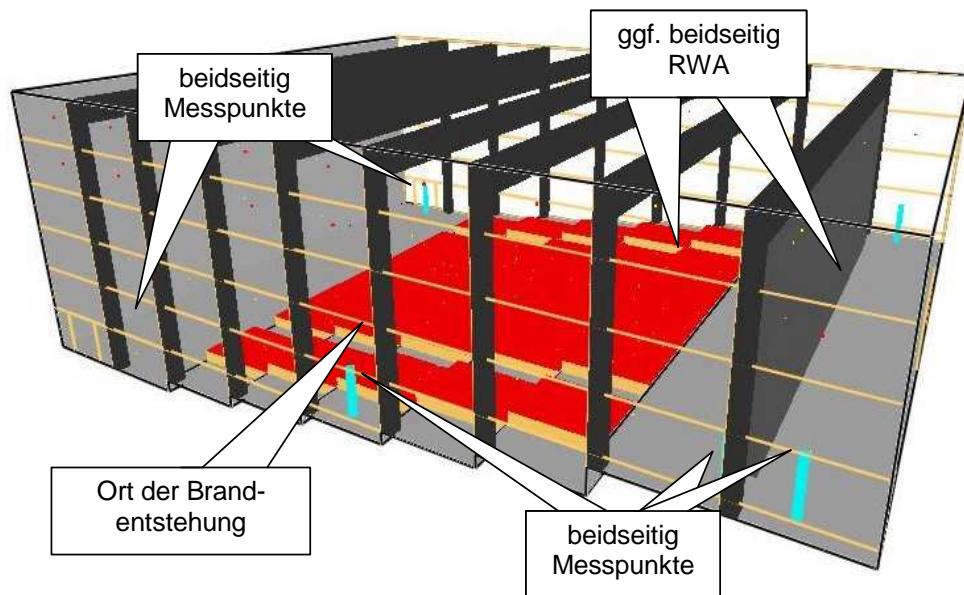


Bild A2.37 Hörsaalmodell für die Berechnung mit FDS4

A2.5.2.2 Brand im Hörsaal mit wirksamer RWA

Vorstudien ergaben, dass für die Wärmefreisetzung-Zeitkurve nach Gleichung (A2.43) deckenmontierte Rauchmelder auch bei einer Rauchausbeute von nur 0,001 g/g innerhalb von 60 s auslösen. Aufgrund einer maximalen Öffnungsduer von 60 s öffnen die RWA nach 120 s. Konservativ wurden nur die ungünstig gelegenen Haupteingangstüren als Zuluftflächen angesetzt, da bei einer Auslegung gemäß § 16 (2) MVStättV ein Öffnen beispielsweise der Notausgangstüren nicht sichergestellt ist. Vergleichssimulationen zeigen zudem, dass eine Reduzierung der Öffnungsflächen von zwei Türen je 2 m x 2,5 m auf nur eine Öffnung von 1 m x 2,5 m zur Berücksichtigung des Personenstroms innerhalb der Tür ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Die Tabelle A2.11 zeigt die Zeiten bis zum Erreichen der Schutzzielkriterien (Tabelle A2.10) an den acht Messpunkten (vgl. Bild A2.37).

Tabelle A2.11 Zeiten in Sekunden bis zur Nichteinhaltung der Schutzzielkriterien für das Szenario mit Öffnen der Rauchabzüge nach 120 s und Nachströmöffnung von 2,5 m²

Messpunkt	Erkennungsweite	raucharme Schichthöhe	FED
Notausgang li./re.	315 / 320	595 / 370	615 / 605
Stufengangmitte li./re.	295 / 285	370 / 365	590 / 600
vor der Wandscheibe li./re.	285 / 245	480 / 575	685 / 830
Zwischenraum der Wandscheibe li./re.	250 / 250	395 / 520	670 / 660

A2.5.2.3 Brand im Hörsaal ohne Entrauchung

Zur Bewertung des Einflusses der RWA auf die Personensicherheit wurde eine zweite Simulation durchgeführt, bei der ein Gasaustausch während der gesamten Zeit nur über die Haupteingangstüren stattfand. Die Tabelle A2.12 stellt die Ergebnisse analog Tabelle A2.11 dar.

Tabelle A2.12 Zeiten in Sekunden bis zur Nichteinhaltung der Schutzzielkriterien für das Szenario ohne Öffnen der Rauchabzüge

Messpunkt	Erkennungsweite	raucharme Schichthöhe	FED
Notausgang li./re.	335 / 320	390 / 340	570 / 555
Stufengangmitte li./re.	300 / 290	320 / 340	560 / 560
vor der Wandscheibe li./re.	230 / 240	255 / 250	525 / 540
Zwischenraum der Wandscheibe li./re.	230 / 240	280 / 260	530 / 530

Diskussion der Simulationsergebnisse

Es wird an jedem Messort zunächst eine Erkennungsweite von 10 m in 2 m Höhe unterschritten, dann unterläuft die raucharme Schichthöhe die 2,5 m-Marke und schließlich wird in 2 m Höhe ein FED von 0,1 erreicht. Erwartungsgemäß werden die Kriterien an den höher gelegenen Messpunkten früher überschritten als im Bereich der Notausgänge. Der Einfluss der RWA ist erkennbar, wirkt sich aber auf das zuerst erreichte Kriterium „Erkennungsweite“ nur gering aus. Vergleicht man das Kriterium Erkennungsweite mit der auch von Zonenmodellen ausgegebenen Höhe der raucharmen Schicht, so kann das CFD-Modell eine signifikante Sichtentrübung prognostizieren, noch bevor das binäre Kriterium „raucharme Schichthöhe in Augenhöhe“ erfüllt ist. Dieser Sachverhalt wird durch Bild A2.38 verdeutlicht, in dem Ebenenschnitte der Temperatur und der Erkennungsweite zur 300. Sekunde verglichen werden. Die Ebene des höchsten Temperaturgradienten befindet sich oberhalb der Ebene des höchsten Rußkonzentrationsgradienten, der die Erkennungsweiteneinschränkung bewirkt. Über das Phänomen wurde auch aus Brandversuchen berichtet [A2.9].

Der FED gibt im Gegensatz zu den herkömmlichen, rein physikalischen Kriterien die akute Brandgastoxizität wieder. Er 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, so dass die tatsächliche Gefahrenerhöhung nicht widergespiegelt wird. Nur der FED wird hierdurch merklich beeinflusst, da höhere und zusätzliche Schadstoffausbeuten auftreten. Bild A2.39 zeigt den Verlauf des FED am Messpunkt auf dem linken Stufengang vor der Wandscheibe für das Szenario ohne RWA.

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

Der jeweilige Anteil der Schadgase CO, HCN, CO₂ und O₂-Mangel wird ebenfalls dargestellt. Solange an den Messort keine Brandgase gelangen, ist der FED Null. Der Vergleich mit der CO-Konzentration macht den schnellen Anstieg des FED deutlich.

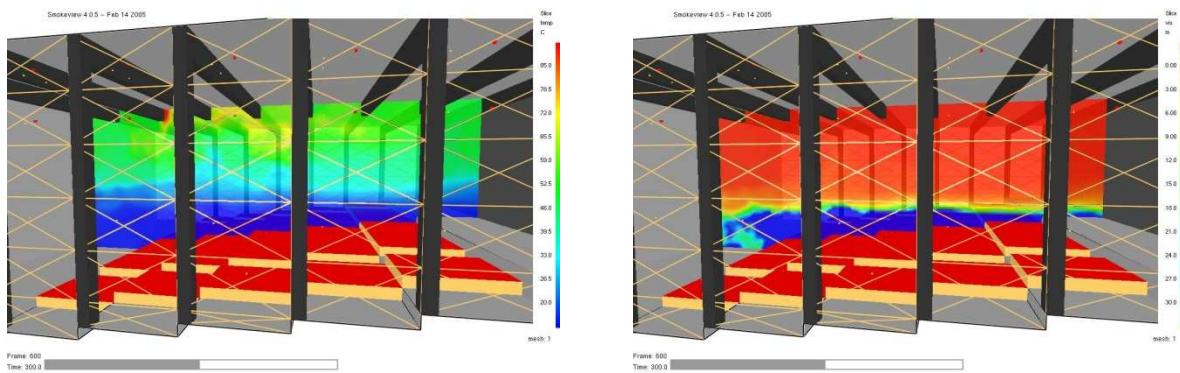


Bild A2.38 a + b Vergleich zweier Ebenenschnitte zur 300. Sekunde: (a) Temperaturverlauf im Bereich 20°C bis zur Maximaltemperatur von 85°C; (b) Erkennungsweite von 0 m bis 30 m. Der Gradient der max. Erkennungsweiteeinschränkung befindet sich unterhalb des max. Temperaturgradienten

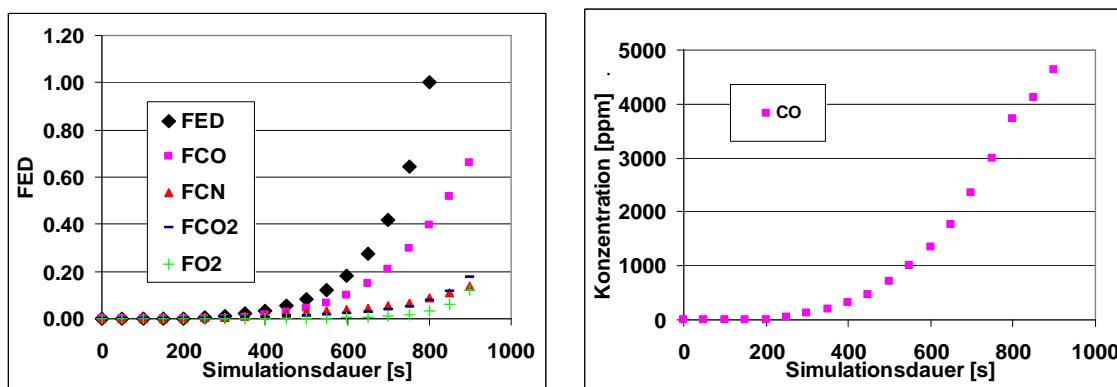


Bild A2.39 a + b Verlauf des (a) FED mit den Teilbeiträgen sowie zum Vergleich (b) die CO-Konzentration beim Brandszenario ohne RWA am Messpunkt auf dem linken Stufengang vor der Wandscheibe

A2.5.2.4 Brand im Foyerbereich vor dem Hörsaal

Bei einer Entfluchtung des Hörsaals über die Notausgänge wird das Foyer nicht durchquert. Da sich aber erfahrungsgemäß der größte Anteil der Personen in Richtung Hauptausgang bewegt, wird untersucht, wie lange der Atriumbereich für Personenströme aus dem Hörsaal passierbar ist.

Der Atriumbereich des Bürogebäudes wurde ebenfalls mit FDS4 mit einem Knotenabstand von 25 cm diskretisiert (Bild A2.40). Die Brandquelle wurde im Eingangsbereich des Atriums angenommen. Für die Büroausstattung mit Holzschriften wurde wiederum das Verbrennungsmodell von Holz verwendet. Die in A2.2 bestimmte maximale Wärmefreisetzungsr率 von 1.800 kW ist für ein Brandszenario in diesem gesprinklerten Gebäude abdeckend. Da der Übergang zum Hörsaalgebäude in 4,75 m Höhe ist, wird als Schutzzielkriterium eine

dauerhaft einzuhaltende Höhe der raucharmen Schicht von 7,25 m gewählt. Wie zuvor dargestellt, lässt sich eine teilweise Verrauchung des Rettungsweges nicht vollständig ausschließen. Es wirkt sich positiv aus, dass der Rettungsweg zunächst nach unten in einen rauchärmeren Bereich führt. In Tabelle A2.13 ist die stationäre Höhe der raucharmen Schicht als Ergebnis verschiedener Auslegungsvarianten der RWA dargestellt. Die Abzugsflächen der natürlichen Entrauchung befinden sich im Dach. Als Zuluftflächen dienen in der Simulation die Türen sowie ggf. gegenüberliegende Flächen. Die Auslegungsvarianten 3 bis 5 sind geeignet, zusammen mit einer Löschanlage das Schutzziel dauerhaft zu erfüllen. Da eine Verrauchung der oberen Umgänge nicht verhindert werden kann, ist zur Evakuierung der Büroräume ein Fluchtbalkon erforderlich.

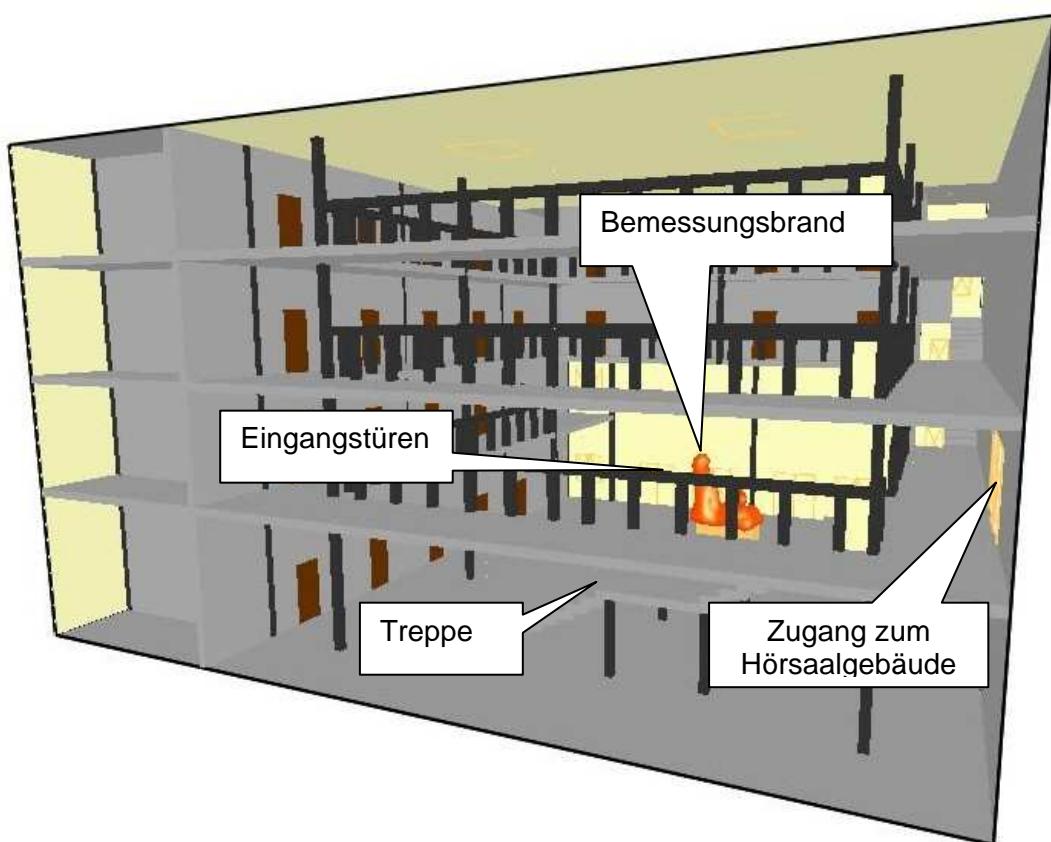


Bild A2.40 Foyermodell für die Berechnung mit FDS4

A2.5.3 Modellierung des Entfluchtungsverlaufs

A2.5.3.1 Auslegungsgrundlagen

Der Hörsaal verfüge über 640 Sitzplätze und maximal bis zu 360 zusätzlicher Personen, die vor der ersten Sitzreihe bzw. auf den Stufen sitzen. Diese Besucherzahl erfordert nach §7(4) 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 von 2 m Breite und die gegenüberliegenden Notausgänge von je 2 m Breite abgedeckt (12 Module, 8 m Gesamtbreite). Die Türen und Öffnungen in der Wandscheibe sowie die vier

Stufengänge und vorgesetzten Treppen decken die Rettungswegbreite ebenfalls ab. Bei der Auslegung der Rettungswegbreiten nach MVStättV wird davon ausgegangen, dass die Ausgangstüren bei optimaler Aufteilung der Personenströme innerhalb von zwei Minuten durchströmt werden [A2.4]. Die maximale Länge der Rettungswege bis zum Erreichen des Foyers bzw. eines Notausgangs nach §7(1) MVStättV wird ebenfalls eingehalten.

Tabelle A2.13 Stationäre Höhe der raucharmen Schicht als Ergebnis verschiedener RWA-Auslegungsvarianten

Auslegungs-variante	Abzugsfläche	Zuluftfläche	stat. Höhe der raucharme Schicht
1	4 x 9 m ² (5,3 %)	8 x 2,25 m ² (2,7 %)	5,0 m
2	4 x 16 m ² (9,5 %)	8 x 2,25 m ² (2,7 %)	5,5 m
3	4 x 9 m ² (5,3 %)	8 x 2,25 m ² + 4 x 2,25 m ² (4,0 %)	7,6 m
4	4 x 9 m ² (5,3 %)	8 x 2,25 m ² + 6 x 2,25 m ² (4,7 %)	7,5 m
5	4 x 16 m ² (9,5 %)	8 x 2,25 m ² + 4 x 2,25 m ² (4,0 %)	7,4 m

A2.5.3.2 Vorgehensweise

Die Räumungszeit $t_{Räumung}$ ist nach Gleichung (9.2) definiert als die Summe der Zeitspannen $t_{Detektion}$, t_{Alarm} , $t_{Reaktion}$ und t_{Flucht} .

Brandausbruch im Hörsaal

Die Zeitspannen $t_{Detektion}$ und t_{Alarm} hängen von der Brandentwicklungsgeschwindigkeit und dem Ort der Brandentstehung ab. Bei Brandausbruch im Hörsaal gehen $t_{Detektion}$ und t_{Alarm} in $t_{Reaktion}$ auf.

Für die Reaktionszeiten bzw. Pre-Movement-Zeiten $t_{Reaktion}$ der Personen, die einen bedeutenden Anteil an der Gesamtdauer $t_{Räumung}$ haben können, wird in Kapitel 9 die von Purser, z. B. [A2.6], entwickelte Vorgehensweise vorgeschlagen, in der von einer Verteilung der individuellen Reaktionszeiten ausgegangen wird. Diese Verteilungen (Bild A2.41) wurden abhängig von der Gebäudeart und -nutzung sowie der brandschutztechnischen Infrastruktur entwickelt. Die hohe Personenzahl im Hörsaal führt zu frühen Stauungen an den Engpässen. Deshalb kann für die Reaktionszeit $t_{Reaktion}$ der Wert Δt_1 eingesetzt werden, da es zunächst unerheblich ist, ob die Personen im Stau stehen oder noch nicht reagiert haben [A2.6].

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*“ eingestuft.

reeren 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 zeitverzögerte Alarmierung der betroffenen Bereiche“ vorhanden und wirksam. Zudem kann von einer direkten Alarmierung der Anwesenden durch das Feuer ausgegangen werden. Der letzte Parameter M für das Brandschutzmanagement nach Tabelle 9.4 hat einen bedeutenden Einfluss auf die auszuwählenden Reaktionszeiten (Bild A2.41). Wenn ein „Brandschutzmanagement entsprechend dem erforderlichen Mindeststandard hinsichtlich der Personensicherheit“ (Kategorie M3) angenommen wird, ist der Tabelle 9.5 eine Reaktionszeit von über 15 Minuten zu entnehmen, wobei dieser Wert auf Grund weniger Datensätze noch nicht abgesichert ist. Wenn dagegen ein Lautsprechersystem oder geschultes Personal vorhanden ist und als wirksam angenommen werden kann (Kategorie M3), sind der Tabelle 9.5 die Werte $\Delta t_1 = 1$ min und $\Delta t_{99} = 2$ min zu entnehmen.

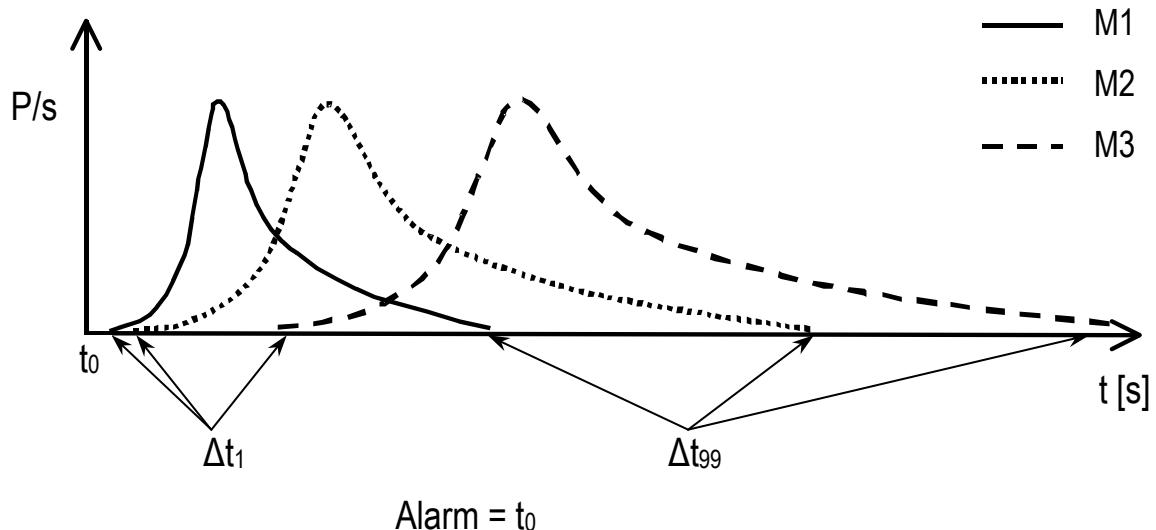


Bild A2.41 Prinzipieller Verlauf der Pre-Movement-Zeiten t_{Reaktion} und Darstellung des Einflusses des Brandschutzmanagements auf die Verläufe nach Purser [A2.6]

Da die Daten im Wesentlichen aus Räumungsversuchen ohne Brandereignis abgeleitet wurden, wird ersatzweise ein Bezug zum Brandszenario in A2.2 hergestellt: 2 min nach Entzündung brennt das Feuer auf $3,1 \text{ m}^2$ mit einer Leistung von 675 KW. Es ist davon auszugehen, dass unter diesen Umständen die Fluchtbewegung eingesetzt hat. Durch den Bezug zum Brandszenario schließt dieser Zeitraum die Zeiten $t_{\text{Detektion}}$ und t_{Alarm} ein.

Brandausbruch im Foyer

Da nur von einem Brandschutzmanagement entsprechend dem Mindeststandard (M3) ausgegangen wird, kann eine schnelle Reaktion der Personen im Hörsaal nicht unterstellt werden. Für die Betrachtung einer möglichen Personenbewegung vom Hörsaal in das Foyer kann deshalb keine abdeckende Brandentwicklungsduer abgeleitet werden.

Bestimmung der Fluchtdauer

Der letzte Summand der Gl. (9.2) ist die Dauer der Fluchtbewegung bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches t_{Flucht} . Aus Vergleichsgründen wird t_{Flucht} hier sowohl mit den relativ einfachen Ansätzen zur Kapazitätsanalyse als auch mit einem komplexeren hydraulischen Strömungsmodell berechnet.

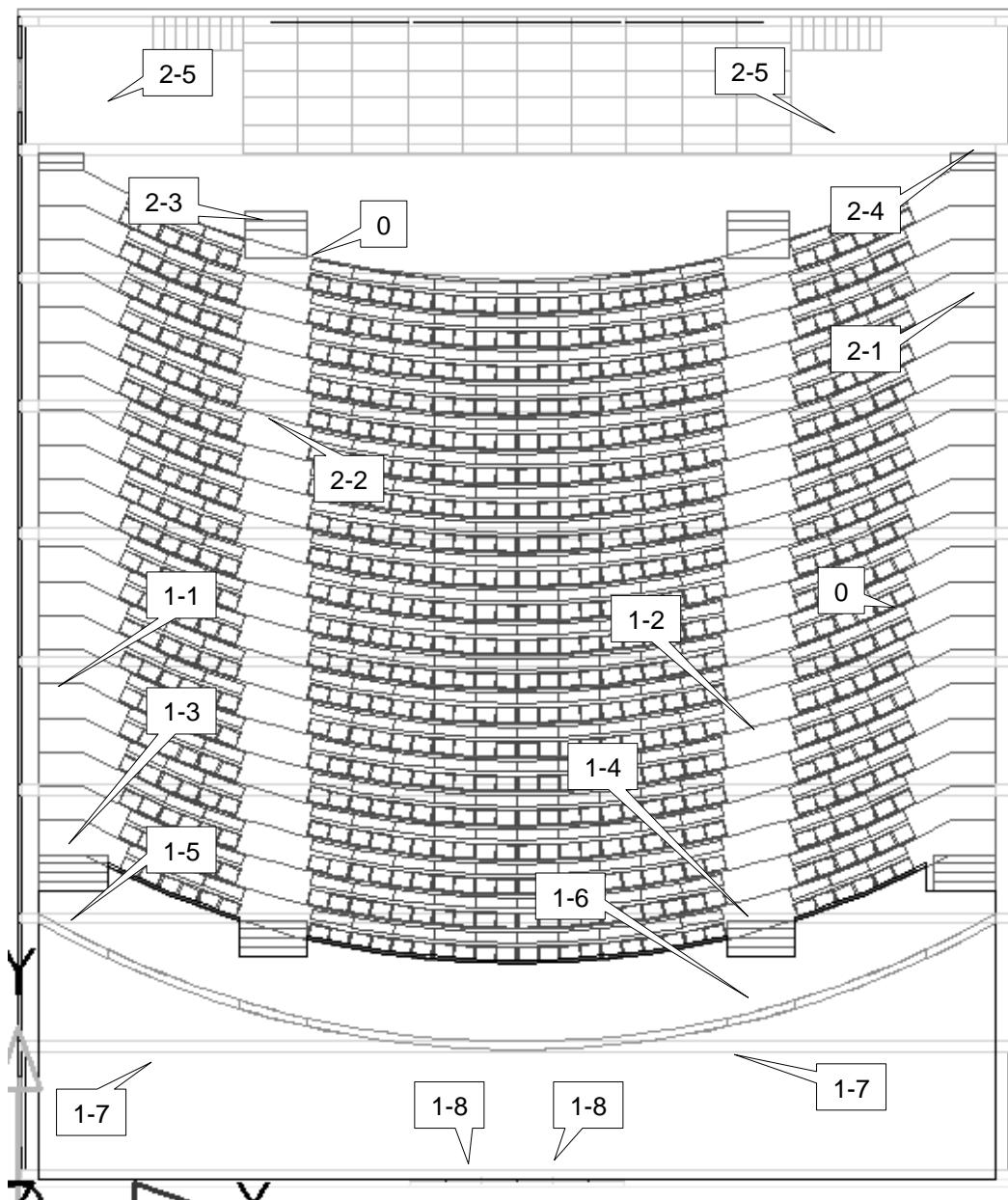


Bild A2.42 Draufsicht des Hörsaals mit Bezeichnung der Wegelemente beider Rettungswägen (0) sowie des ersten und des zweiten Rettungsweges (1-i bzw. 2-i) entsprechend der Tabelle A2.14

Kapazitätsanalyse

Die Fluchtbewegung der Personen aus dem Hörsaal erfolgt über verschiedene Wegelemente, für die aus empirischen Untersuchungen Daten über die spezifische Durchlasskapazität (meist in $P/(m^2 \cdot s)$) in Abhängigkeit der Personendichte (P/m^2) vorliegen. Für das hier betrachtete Szenario sind als Wegelemente (Bild A2.42) 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 Fluchtzeiten für die letzten Personen, die über einen jeweiligen Rettungsweg flüchten.

In Tabelle A2.14 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. Dem Vorschlag in Kapitel 9 folgend, wurden den Wegelementen die geringen spezifischen Durchlasskapazitäten (Sp. 5) und Bewegungsgeschwindigkeiten (Sp. 9) für moderate Auslastung ($D \approx 1 P/m^2$) zugeordnet. Die Durchgangsbreite muss ggf. für Treppen um den Überstand der Handläufe reduziert werden, um die freie Durchgangsbreite zu erhalten.

Es sind jeweils die Horizontalkomponenten der Längen, Geschwindigkeiten und Kapazitäten maßgebend. Die Durchlasskapazität (Sp. 6) ist das Produkt aus freier Durchgangsbreite (Sp. 4) und spezifischer Durchlasskapazität (Sp. 5). Die gesamte Durchlasskapazität (Sp. 7) ist das Produkt aus der Durchlasskapazität und der Anzahl der parallelen Wegelemente im ersten oder zweiten Fluchtweg (Sp. 3). Die Laufzeit (Sp. 10) ist der Quotient aus maximaler Länge (Sp. 8) und Gehgeschwindigkeit (Sp. 9).

Zur Bestimmung der Zeit t_{Flucht} wird vereinfacht davon ausgegangen, dass der Kopf des Personenstroms ungehindert den Fluchtweg passiert, während sich der weitere Teil des Personenstroms am Wegelement mit der geringsten Durchgangskapazität durchfädeln muss. Beispielsweise kann der Weg über die seitlichen Stufengänge zum Hauptausgang wie folgt bestimmt werden: Die ersten Personen des Personenstroms werden sich im Bereich der oberen Sitzreihen erheben und einen Teil des Stufengangs (Nr. 1-1, ca. 5 s), die Treppe (Nr. 1-3, 2,5 s), die Engstelle (Nr. 1-5, 0,25 s), den horizontalen Weg (Nr. 1-7, 15 s) und schließlich eine Eingangstür (Nr. 1-8, 0,5 s) durchlaufen, so dass sie in weniger als 25 s den gesicherten Bereich im Foyer erreichen. Die geringste Durchlasskapazität weist der Stufengang (Nr. 1-1) mit 0,96 P/s auf, so dass beispielsweise 200 Personen zum Verlassen dieses Elements 208,3 s benötigen. Der gesamte Vorgang dauert entsprechend ca. 233 s (knapp 4 min).

Zur Bestimmung der Fluchtzeiten werden für die maximal anzunehmende Besucherzahl von 1.000 Personen vier Räumungsszenarien diskutiert:

- optimale Verteilung der Personenströme (minimale Fluchtzeit t_{Flucht}),
- konservativ angenommene Verteilung von 80 % der Besucher, die den ihnen bekannten Haupteingang bevorzugen, zu 20 % der Besucher, die durch die Notausgänge flüchten,

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

Tabelle A2.14 Eigenschaften der zu passierenden Wegelemente bei Entfluchtung des Hörsaals. Bewegungsparameter für „moderate Auslastung“ aus Kapitel 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nr.	Wegelement	Anzahl im Rettungsweg	freie 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

¹ Die Kapazität zwischen den Reihen ist unabhängig von der Breite. Nach [A2.10] für „normale“ Bewegung für Personen in „Übergangsstraßenkleidung“.

² Stufengänge werden konservativ als Treppe mit den gleichen Bewegungsparametern aufwärts und abwärts betrachtet.

³ Falls der Bereich zwischen Wandscheibe und Ausgang für Ausstellungen etc. benutzt wird, muss die Mindestbreite sichergestellt sein.

⁴ Die Treppe ist gem. [A2.2] mittig durch einen zweiläufigen Handlauf geteilt.

- c) Flucht nur durch die Notausgänge, weil das Foyer nicht passierbar ist,
- d) Flucht nur durch die Hauptausgänge, weil die Notausgänge durch das Brand-szenario bzw. aufgrund organisatorischer Mängel nicht zur Verfügung stehen.

- Zu a) Von den Sitzreihen können $6 \times 20 \times 0,63 \text{ P/s} = 75,6 \text{ P/s}$ in die Stufengänge strömen. Über die vier Stufengänge können in beide Richtungen aber nur $2 \times (1,92 + 2,88) \text{ P/s} = 9,6 \text{ P/s}$ abströmen, so dass die Stufengänge einen ersten Engpass darstellen. Im weiteren Verlauf des 1. Fluchtwegs erweisen sich die Hauptausgangstüren (Nr. 1-8) bzw. Notausgangstüren (Nr. 2-6) mit $3,6 \text{ P/s}$ als Engstellen zum Verlassen des Raums. Ein Rückstau durch den Treppenabgang im Foyer (Nr. 1-9) wird nicht prognostiziert. Das Gebäude kann somit bei optimaler Personenaufteilung in den Sekunden bis zu Erreichen der Ausgänge plus $1.000 \text{ P} / (3,6 + 3,6) \text{ P/s} = 139 \text{ s}$ als Passagedauer der Ausgänge geräumt werden.
- Zu b) Die Betrachtung der Verhältnisse aus den Personenströmen zu den Durchlasskapazitäten zeigt, dass die Haupteingänge mit $800 \text{ P} / 3,6 \text{ P/s} = 222 \text{ s}$ viel länger durchströmt werden als die Notausgänge ($200 \text{ P} / 3,6 \text{ P/s} = 56 \text{ s}$). Die letzte Person verlässt den Hörsaal nach ca. 247 s.
- Zu c) Die Zeit bis zum Erreichen eines Notausgangs über die seitlichen Stufengänge (Nr. 2-1, ca. 5 s), die Treppe (Nr. 2-4, 1,17 s) und den Weg (Nr. 2-5, 10 s) beträgt ca. 16 s. Beide Notausgänge werden mit je 500 Personen für $500 \text{ P} / 1,80 \text{ P/s} = 278 \text{ s}$ durchströmt, so dass der Gesamtvorgang ca. 294 s dauert.
- Zu d) Zur oben erläuterten Zeit von ca. 25 s bis zum Erreichen der Eingangstüren muss die Passagezeit von $1.000 \text{ P} / 3,6 \text{ P/s} = 278 \text{ s}$ addiert werden, so dass der Vorgang ca. 300 s dauert.

In Tabelle A2.15 werden die Ergebnisse der Szenarien a) bis d) zusammengefasst.

Tabelle A2.15 Fluchtzeiten für vier Szenarien a) bis d) bestimmt mit der Kapazitätsanalyse

Fluchtszenario	letzte Person verlässt Hauptausgang	letzte Person verlässt Notausgang
a) optimale Verteilung	164 s	164 s
b) Verteilung 80 % / 20 %	247 s	72 s
c) nur Nutzung der Notausgänge	-	294 s
d) nur Nutzung der Hauptausgänge	303 s	-

Dynamisches Strömungsmodell

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

Anhang 2 Anwendungsbeispiele

und Durchlasskapazitäten ergeben. Dieser Zusammenhang, auch als Fundamentaldiagramme bezeichnet, wird von verschiedenen Autoren wiedergegeben, von denen wohl die Arbeit von Predtetschenski und Milinski [A2.10] am geschlossensten ist. Zur Berücksichtigung verschiedener Personengruppen wurde dort eine Projektionsfläche eingeführt, so dass die Personendichte nicht in $[P/m^2]$, sondern in $[m^2/m^2]$ angegeben wird. Bild A2.43 zeigt die Fundamentaldiagramme bezogen auf eine Gruppe aus je 50 % Personen in „Übergangsstraßenkleidung“ ($0,113 m^2/P$) und Personen mit leichtem Gepäck wie Aktentaschen ($0,180 m^2/P$) für verschiedene Wegelemente und „Normalbedingungen“. Der Vergleich mit den Werten aus Tabelle A2.14 zeigt, dass die statischen Werte hier nur für den Strom durch Engstellen konservativ sind.

Um die sich im Modell [A2.10] einstellende Personendichte in $[m^2/m^2]$ zu erhalten, wird von einem spezifischen Durchfluss („Bewegungsintensität“) q_i am Wegelement i ausgegangen, der sich aus der Dichte D mal der Geschwindigkeit v zusammensetzt.

$$q_i = D \cdot v \quad (\text{A2.44})$$

Es wird davon ausgegangen, dass der Durchfluss q_{i+1} im nächsten Wegelement $i+1$ aus dem Verhältnis der Wegbreiten b den Wert

$$q_{i+1} = q_i \cdot \frac{b_i}{b_{i+1}} \quad (\text{A2.45})$$

einnimmt. Entsprechend der im Bild A2.43 dargestellten Zusammenhänge ergeben sich aus dem Durchfluss q_{i+1} für das Wegelement $i+1$ eine neue Dichte und Gehgeschwindigkeit. Falls das Wegelement $i+1$ den durch die Wegbreitenveränderung erforderlichen spezifischen Durchfluss 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 [A2.11].

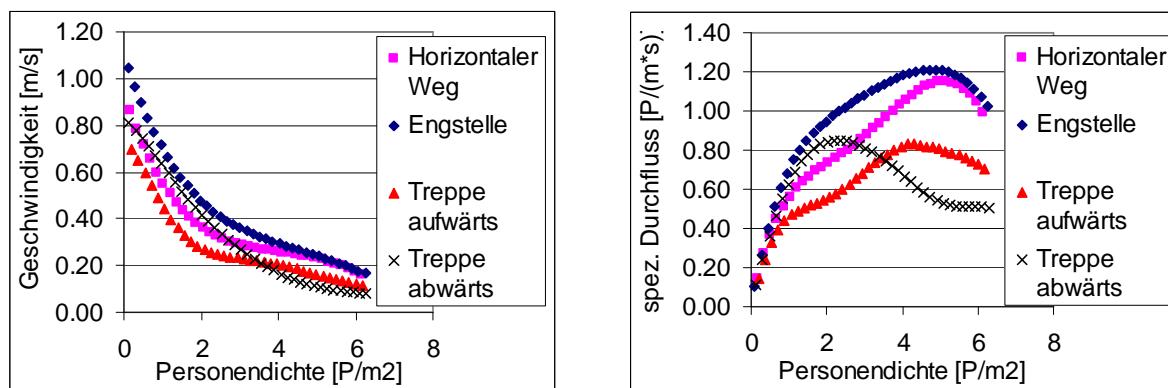


Bild A2.43 a + b Zusammenhang zwischen Personendichte und (a) Laufgeschwindigkeit bzw. (b) spezifischem Durchfluss auf verschiedenen Wegelementen für „Normalbedingungen“ aus Werten nach [A2.10]

Für den Fluchtverlauf in Richtung Haupteingang wird mit diesem Modell unter „Normal-“ und „Gefahrenbedingungen“ gerade kein Stau prognostiziert, da sich die anfangs hohe Perso-

nendichte auf den Stufenreihen bis zur Ausgangstür entzerrt hat, so dass ein optimaler Personenstrom stattfindet. Da die Treppe im Foyer aber eine geringere spezifische Durchlasskapazität als die Engstelle aufweist (vgl. Bild A2.43), wird vor der Treppe eine Staubildung angezeigt, die konservativ als Rückstau in den Hörsaal berücksichtigt wird. Der Fluchtverlauf durch die Notausgänge führt zu keiner Staubildung. In Tabelle A2.16 sind die Berechnungsergebnisse für „Normalbedingungen“ und „Gefahrenbedingungen“ dargestellt.

Tabelle A2.16 Fluchtzeiten für vier Szenarien a) bis d) für „Normalbedingungen“ und „Gefahrenbedingungen“ bestimmt mit dem dynamischen Modell [A2.10]

Fluchtszenario	letzte Person verlässt Hauptausgang	letzte Person verlässt Notausgang
a) optimale Verteilung	227 s / 186 s	227 s / 186 s
b) Verteilung 80 % / 20 %	426 s / 342 s	87 s / 73 s
c) nur Nutzung der Notausgänge	-	361 s / 302 s
d) nur Nutzung der Hauptausgänge	524 s / 422 s	-

Vergleich der bestimmten Fluchtdauern

Der Vergleich der Ergebnisse der Tabelle A2.16 mit den Ergebnissen aus der Kapazitätsanalyse (Tabelle A2.15) zeigt, dass die Fluchtzeiten durch den Hauptausgang im Verfahren nach [A2.10] erheblich länger sind als bei der Kapazitätsanalyse. Dies erklärt sich im Wesentlichen dadurch, dass mit der Kapazitätsanalyse der Stau vor der Treppe im Foyer nicht erkennbar ist, weil für das Element „Treppe abwärts“ eine gemessen am Modell von Predtetschenski und Milinski viel zu hohe Durchflusskapazität angesetzt wird. Als weiterer Aspekt beim Vergleich der Fluchtzeiten kommt hinzu, dass beim zweiten Modell Personen mit Aktentaschen berücksichtigt werden, die entsprechend der größeren Projektionsfläche einen linearen Anstieg der Durchströmzeiten bewirken. Bezogen auf „Gefahrenbedingungen“ werden für die Durchflüsse an den Notausgängen allerdings sehr ähnliche Werte prognostiziert. Im Sinne der Auswahl der Bemessungsmethoden ist es unbefriedigend, dass die einfache Methode nicht in jedem Fall zu einem konservativeren Ergebnis führt als die komplexe Methode. Die im Leitfaden verwendeten Daten sind [A2.12] entnommen.

In der gemäß MVStättV anzustrebenden Durchströmdauer der Wegelemente von 2 min wird von einer Tür als Engpass ausgegangen [A2.4]. Falls dagegen Treppen nur die Mindestmaße der Rettungswegbreite aufweisen, wird dieser Zielwert gemäß dem Modell von Predtetschenski und Milinski verfehlt.

Bestimmung der Räumungszeit

Die Räumungszeit für das Brandszenario im Hörsaal setzt sich entsprechend Gleichung (9.2) aus dem zu 120 s angesetzten Intervall $t_{\text{Detektion}} + t_{\text{Alarm}} + t_{\text{Reaktion}}$ und der Fluchtzeit t_{Flucht} zusammen. Die Fluchtzeit für das Szenario b) wird aus den Ergebnissen des dynamischen

Modells für „Gefahrenbedingungen“ konservativ mit 350 s angenommen, so dass die Gesamtdauer $t_{\text{Räumung}}$ 470 s beträgt. Die Modellergebnisse zeigen aber auch die Möglichkeit zur Optimierung des Rettungsweges über die Anforderungen der MVStättV hinaus. Nach Verbreiterung der Treppe im Foyer würden beide Modelle für das Szenario b) eine Fluchtwelt t_{Flucht} von ca. 250 s ergeben und $t_{\text{Räumung}}$ ca. 370 s betragen.

Für die Betrachtung einer Flucht durch das Foyer können keine sinnvollen Daten ermittelt werden, da sich das Intervall $t_{\text{Detektion}} + t_{\text{Alarm}} + t_{\text{Reaktion}}$ nicht bestimmen lässt. Wenn die Brandsimulation mit einer maximalen, stationären Wärmefreisetzungsr率e durchgeführt wird, lässt sich die Personensicherheit zeitunabhängig nachweisen.

A2.5.3.3 Mikroskopische Modellierung

Im vorangehenden Abschnitt wurde gezeigt, dass die Kapazitätsanalyse und das Modell nach Predtetschenski und Milinski zu merklich unterschiedlichen Räumungszeiten führen. Die wesentliche Ursache für diese Diskrepanzen liegt in den Möglichkeiten dieser Verfahren, das Entstehen bzw. die weitere Entwicklung eines Staus vorhersagen zu können. Dies zeigt sich besonders deutlich in den Szenarien, in denen der Hauptausgang für die Entfluchtung zur Verfügung steht. Daher wurden die beiden Szenarien „Flucht durch alle Ausgänge“ und „Flucht nur durch die Hauptausgänge“ nochmals mit dem mikroskopischen Evakuierungsmodell (Individualmodell) ASERI untersucht, um den Räumungsverlauf im Detail analysieren zu können.

Die Fluchtwegewahl wird bei dieser mikroskopischen Analyse dynamisch durch das Simulationsprogramm bestimmt. D. h. es ist nicht nötig, vorab eine optimal gleichmäßige Auslastung der verfügbaren Ausgänge oder eine bestimmte prozentuale Aufteilung vorzugeben. Dabei kann es - je nach Übersichtlichkeit des Gebäudes und dynamischer Entwicklung der Personendichte in den einzelnen Bereichen - zu einer mehr oder weniger optimalen Auslastung der verfügbaren Ausgänge bzw. Fluchtwege kommen. Einen Überblick über Möglichkeiten zur Beschreibung der (individuellen) Fluchtwegewahl im Rahmen einer mikroskopischen Modellierung bietet [A2.30].

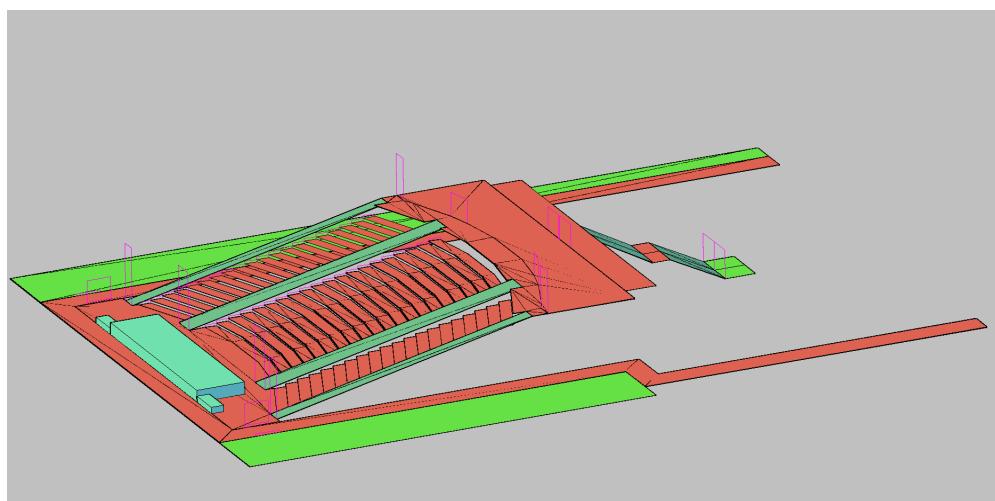


Bild A2.44 3D-Ansicht des Hörsaalgebäudes erstellt mit einem mikroskopischen Evakuierungsmodell

Bild A2.44 zeigt eine 3D-Ansicht des Hörsaalgebäudes, erstellt mit dem Modell ASERI. Einen Einblick in den Räumungsverlauf gibt der Grundriss in Bild A2.45 mit der Personenverteilung nach 2 Minuten Fluchtzeit. Der Grundriss 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 im Szenarium „Entfluchtung nur durch die Hauptausgänge“ nicht nur vor der Treppe sondern vor allem auch im Foyerbereich selbst ein Stau bildet, der zeitweise auch den Ausstrom aus den beiden zentralen Ausgängen des Auditoriums behindert.

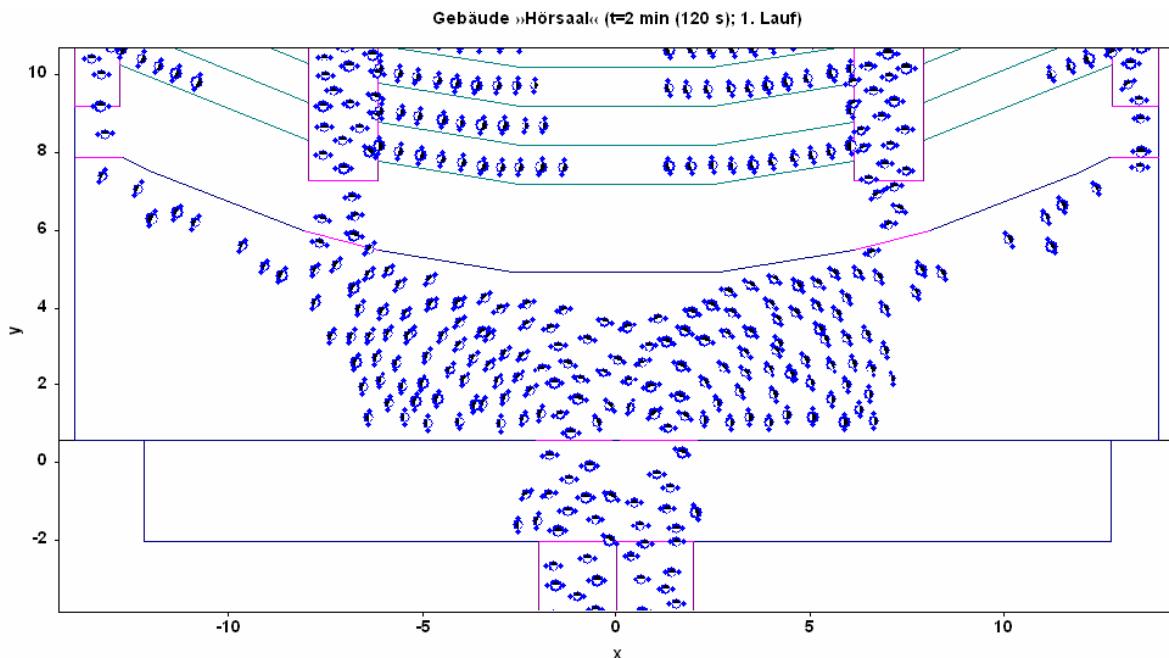


Bild A2.45 Staubildung im Foyerbereich

Tabelle A2.17 zeigt einen Vergleich der (auf $\frac{1}{2}$ min gerundeten) Fluchtzeiten zwischen den beiden makroskopischen Modellen und dem mikroskopischen Modell ASERI. Die Zeitangabe vor dem Schrägstrich bezieht sich auf „Normalbedingungen“ (dies entspricht bei ASERI dem in der Regel für eine Bemessung anzuwendenden Bewegungsmodus „Entfluchtung“), diejenige hinter dem Schrägstrich auf „Gefahrenbedingungen“.

Tabelle A2.17 Vergleich der Fluchtzeiten im makroskopischen und mikroskopischen Modell

Fluchtzeit	alle Ausgänge	Hauptausgang
Kapazitätsanalyse (stat.)	2 $\frac{1}{2}$ min	5 min
P & M (dyn.)	4 min / 3 min	8 $\frac{1}{2}$ min / 7 min
ASERI	4 min / 3 min	7 min / 6 min

Im Szenarium ohne relevante Staubildung (alle Ausgänge werden benutzt) stimmen ASERI und das Modell nach Predtetschenski und Milinski überein. In dem Szenarium mit Staubildung (nur Hauptausgänge) führt die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene konservati-

ve Vorgehensweise der Berücksichtigung eines Rückstaus in den Hörsaal bei der Berechnung mit dem Modell von Predtetschenski und Milinski zu einer Überschätzung der Fluchzeit. Die mikroskopische Analyse zeigt, dass es in der Tat zu einem Rückstau in den Hörsaal kommt, jedoch nur zeitweise und wenig stark ausgeprägt, da der Foyerbereich ausreichend Ausweichfläche bietet, um sich vor den zu den Treppen führenden Ausgängen zu formieren. Dagegen liefert die Kapazitätsanalyse in beiden Fällen eindeutig optimistische Resultate.

A2.5.4 Schlussbetrachtung

Für das Gefahrenszenario im Hörsaal zeigt der Vergleich der Zeiten bis zur Nichteinhaltung der Nachweiskriterien „Erkennungsweite“ und „Höhe der raucharmen Schicht“ aus den Tabellen A2.10 und A2.11 mit der bestimmten Räumungsdauer, dass bei konservativer Herangehensweise eine gefahrlose Räumung nicht nachgewiesen werden kann. Wenn unterstellt wird, dass der Räumungsverlauf durch Erreichen der vorgenannten Kriterien nicht wesentlich beeinflusst wird, zeigt die zusätzliche Betrachtung des FED allerdings auch, dass kein katastrophaler Ausgang prognostiziert wird.

Aus den Überlegungen dieses Kapitels und des Kapitels A2.2 werden einige Einflüsse deutlich, die sich auf das Verhältnis $t_{\text{verfügbar}}$ zu $t_{\text{Räumung}}$ auswirken. Hier ist vor allem die Beschreibung der Brandausbreitung zu nennen, die sich aufgrund des üblicherweise angenommenen quadratischen Anstiegs der Wärmefreisetzungsraten erheblich auswirkt. Wie gesehen, wird $t_{\text{verfügbar}}$ auch durch die Wahl der Nachweiskriterien wie „Erkennungsweite“ oder „Höhe der raucharmen Schicht“ (hier Höhe der Kaltgassschicht) beeinflusst.

Aussagen zum Verhalten von Personen im Gefahrenfall sind sicher mit nicht geringeren Fehlern behaftet. Die im Leitfaden aufgezeigte Herangehensweise zur Bestimmung der Reaktionsdauer ist ein gut nachvollziehbarer Ansatz, allerdings können mit den vorhandenen Daten nicht alle Fälle abgedeckt werden. Die Berücksichtigung eines Brandes im Aufenthaltsraum geschieht innerhalb der Kategorisierung nicht. Die Ergebnisse der Modelle zur Bestimmung der Fluchtdauer gelten im Allgemeinen als relativ gut vergleichbar, so dass die hier für die Treppe im 1. Rettungsweg aufgetretene große Abweichung eher untypisch ist.

Die Streuungen in den verfügbaren Basisdaten sollten mittels konservativer Annahmen für die Wärmefreisetzungsraten, Schadstoffausbeute, Personenströme etc berücksichtigt werden.

Eine Unsicherheit bei der Anwendung von Ingenieurmethoden ergibt sich aus den zu entwickelnden Szenarien. Dies betrifft z. B. den Brandentstehungsort, die Berücksichtigung von Brandschutzmaßnahmen und die Verteilung der Personenströme auf die Ausgänge. Bzgl. des Brandentstehungsortes wird in [A2.6] darauf hingewiesen, dass verdeckt entstehende Brände, die plötzlich durch Wegfall der Trennung zum Aufenthaltsraum wirksam werden, als besonders gefährlich anzusehen sind. Die Feuer in einem Tanzsaal in Göteborg oder der Flughafenbrand in Düsseldorf fallen unter diese Kategorie. Die Simulation solcher Brandszenarien erfordert umfangreichere Basisdaten und Annahmen als bei dem hier betrachteten offenen Brand. Die Berücksichtigung von RWA zur Gewährleistung des Personenschutzes wird in [A2.4] und [A2.13] kritisch gesehen, weil z. B. die Art der Auslösung, der Zeitraum bis zum Wirksamwerden und der Wartungszustand mit in Betracht gezogen werden müssen. Auch die Verfügbarkeit der Notausgangstüren sollte kritisch betrachtet werden, da sie die

Dauer t_{Flucht} erheblich beeinflusst. Eine Auswertung von Brandschauen in insgesamt 69 deutschen Vergnügungsstätten während der Besucherzeit zeigte beispielsweise, dass über ein Drittel der Betriebe verschlossene Notausgänge aufwiesen [A2.14]. Hierzu sind nutzungsspezifische Daten auf breiterer Grundlage zu ermitteln.

Da es bei der Betrachtung der Personensicherheit in Versammlungsstätten letztlich um viele Menschenleben geht, ist der Sicherheitsfaktor für das Verhältnis $t_{verfügbar}/t_{Räumung}$ von besonderer Bedeutung. Mehl [A2.13] schlägt hierzu einen abgestuften Sicherheitsfaktor vor:

- $t_{verfügbar}/t_{Räumung} \geq 1,5$ für die Einhaltung von raucharmen oder rauchfreien Zonen
- $t_{verfügbar}/t_{Räumung} \geq 2,0$ für Akzeptanzkriterien, u. a. CO-, CO₂- und HCN-Konzentrationen

Es liegt auf der Hand, dass die Unsicherheiten bei der Entwicklung von Gefahren- und Räumungsszenarien weit größer sind als z. B. bei einer konstruktiven Bemessung. Da ein Sicherheitsfaktor von 1,5 schon dadurch ausgenutzt wird, dass bei der Betrachtung des Räumungsverlaufs ein Fluchtweg nutzbar ist oder nicht, sollten die Sicherheitsfaktoren im Zusammenhang mit den Szenarien und Nachweiskriterien betrachtet werden:

Für ein konservatives Brandszenario in Verbindung mit einem auslegungsgemäßigen Evakuierungsszenario 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 der 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 Schutzzielderfüllung 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 [A2.31] angestellt.

A2.6 Literatur zu Anhang 2

- [A2.1] Musterbauordnung – MBO, Fassung November 2002.
- [A2.2] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Musterversammlungsstättenverordnung – MVStättV), ARGEBAU Fachkommision Bauaufsicht, Fassung Juni 2005, www.is-argebau.de.

- [A2.3] Differenzierte Beurteilung von Rettungswegen mittels Ingenieurmethoden. Anwendungsbeispiel: Bemessung eines Rauchabzugsystems mit einem Feld- und einem Zonenmodell, vfdb-Referat 4, Arbeitsteam 5.
- [A2.4] Begründung und Erläuterung zur Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättV), ARGEBAU Fachkommission Bauaufsicht, Fassung Juni 2005.
- [A2.5] *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.*
- [A2.6] *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. vfdb / iBMB, 2005.*
- [A2.7] *PURSER, D.: Toxicity assessment of combustion products. In: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, Quincy, Massachusetts. 2002.*
- [A2.8] *FORELL, B.: Einteilung, Quellterme und Bewertung der akuten Toxizität von Brandrauch. vfdb-Jahresfachtagung, Mannheim, 2009.*
- [A2.9] *DELICHTS/OS, M.; BLACKMORE, J.; LIU, X.: Should Smoke Yield be Regulated for Wall, Ceiling and Floor Linings?. Fire Technology, 40, S. 263-276. 2004.*
- [A2.10] *PREDTETSCHENSKI, V. M.; MILINSKI, A. I.: Personenströme in Gebäuden – Berechnungsverfahren für die Projektierung. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld. 1971.*
- [A2.11] *JUILFS, J.: Implementierung des Evakuierungsmodells von Predtetschenski und Milinski in MS EXCEL 2000. Studienarbeit. TU Braunschweig. 2005.*
- [A2.12] *PROULX, G.: Movement of People: The Evacuation Timing. In: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, Quincy, Massachusetts. 2002.*
- [A2.13] *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.*
- [A2.14] *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.*
- [A2.15] *DIN V ENV 1991-1-1, Eurocode 1, Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-1: Grundlagen der Tragwerksplanung, Vornorm Ausgabe Dezember 1995.*
- [A2.16] *DIN EN 1991-1-2: Eurocode 1, Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Ausgabe September 2003.*
- [A2.17] *DIN V ENV 1993-1-2, Eurocode 3, Planung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksplanung für den Brandfall. Vornorm Ausgabe Mai 1997.*
- [A2.18] *DIN V ENV 1991-2-2; Eurocode 1 Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Mai 1997.*

- [A2.19] DIN 4102. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.
 - Teil 2: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Bauteilen, Ausgabe September 1977.
 - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Ausgabe März 1994.
 - Teil 22: Anwendungsnorm zur DIN 4102-4, Ausgabe November 2004.
- [A2.20] Prüfbericht Nr.: F.3-012/88 des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München
- [A2.21] ANSYS Rev. 8.0: Swanson Analysis Systems, Inc. Houston (USA).
- [A2.22] ZEHFUß, J.: Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung, Diss. TU Braunschweig, Juni 2004.
- [A2.23] DOBBERNACK, R.: Konzept und Grundlagenermittlung, 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.
- [A2.24] HOHM, V.: Schutzziele, Brandszenarien und Bemessungsziele, 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.
- [A2.25] 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.
- [A2.26] WEILERT, A.: Brandschutzbemessung der Konstruktion. 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.
- [A2.27] FORELL, B.: Nachweise der Personensicherheit. 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.
- [A2.28] Brandschutz Formeln und Tabellen. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1977.
- [A2.29] DOBBERNACK, R.: Auswertung zur spezifischen Abbrandrate der vorliegenden m-Faktor-Versuche, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1995 (unveröffentlicht).
- [A2.30] SCHNEIDER, V.: Einfluss der Fluchtwegewahl auf Räumungszeiten und Evakuierungseffizienz, vfdb-Zeitschrift 2/2008, Seite 87 - 93
- [A2.31] FORELL, B.: Niveau der Personensicherheit von Versammlungsstätten - Nachweis nach vfdb-Leitfaden. vfdb-Jahresfachtagung, Leipzig, 2007.
- [A2.32] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragswerksplanung, Ausgabe Oktober 2002.

ANHANG 3**Mitarbeiter im vfdb-Referat 4 – Ingenieurmethoden des Brandschutzes (IB)**

- Vorsitzender:** Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser
 Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
 TU Braunschweig, Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig
- Stellv. Vorsitzender:** Ltd. Branddirektor Dipl.-Ing. Harald Hagen
 Landeshauptstadt Wiesbaden, Feuerwehr
 Kurt-Schumacher-Ring 16, 65195 Wiesbaden

Mitglieder:

Dr.-Ing. Gary Blume	MPA Braunschweig, Braunschweig
Dipl.-Ing. Dieter Brein	Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe
Dr.-Ing. Michael Dehne	Dehne, Kruse & Partner, Gifhorn
Dr.-Ing. Reinhold Dobbernack	<i>ehemals:</i> iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig
Dipl.-Ing. Florian Dimai	Siemens AG, München
Dr.-Ing. Burkhard Forell	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln
LBD Dipl.-Ing. Harald Hagen	Landeshauptstadt Wiesbaden, Feuerwehr, Wiesbaden
Dr.-Ing. Thomas Heins	Sachverständigenbüro Dr. Heins, Kleve
Dipl.-Ing. Volker Hohm (GF)	iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser (F)	iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig
BOR Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl	Institut der Feuerwehr LSA, Heyrothsberge
Dr.-Ing. Ulrich Max	Ingenieurbüro für Brandsicherheit, Bruchsal
Dr. Ingrid Mieling	Feuerwehr Hamburg – F05, Hamburg
Dr.-Ing. Ekkehard Richter	iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig
Dipl.-Ing. (FH) Hardy Rusch	VdS Schadenverhütung, Köln
Dr. Volker Schneider	Integrierte Sicherheitstechnik GmbH, Frankfurt
Dr. rer. nat. Willi Siegfried	HHP Nord-Ost Berat. Ingenieure GmbH, Braunschweig
Dipl.-Ing. (FH) Angelika Staimer	Siemens Building Technologies, Karlsruhe
Dr.-Ing. Carola Steinert	DMT GmbH, Dortmund
Dr.-Ing. Mingyi Wang	GDV e. V., Berlin
Dr.-Ing. Jürgen Wiese	Sachverständigenbüro Halfkann + Kirchner, Erkelenz
Ing. Erhard Wilk	Brandschutz Consult Ingenieursges. mbH, Leipzig
Dr.-Ing. Jochen Zehfuß	hhpberlin, Hamburg

Korrespondierende Mitglieder:

Dipl.-Phys. OBR Georg Spangardt	Berufsfeuerwehr Köln, Köln
Dipl.-Ing. René Stüdle	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, Bern
Dipl.-Ing. Wolfgang Thoma	Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien
Dipl.-Ing. Karl Wallasch	HOARE LEA Fire Engineering, London

Externe Fachleute in Arbeitsgruppen:

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Detzer	Imtech Deutschland GmbH & Co. KG, Hamburg
Prof. Dr.-Ing. H. J. Gerhardt	I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik GmbH, Aachen
Dr.-Ing. Christoph Klinzmann	hhpberlin, Hamburg
Dr.-Ing. Olaf Riese	iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig
Dr.-Ing. Ralf Schnetgöke	Gruner AG, Basel
Dipl.-Ing. Astrid Weilert	iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig