

vfdb-Leitfaden

Ingenieurmethoden des Brandschutzes

erarbeitet vom vfdb-Referat 4

„Ingenieurmethoden des Brandschutzes“

herausgegeben von

Dietmar Hossler

Entwurf Juni 2005

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorbemerkung	8
1	9
1.1	9
1.2	11
1.3	11
1.4	12
1.5	13
1.6	14
2	15
2.1	15
2.2	15
2.3	16
2.4	17
2.5	18
3	20
3.1	20
3.2	21
3.3	23
3.3.1	23
3.3.2	24
3.4	26
3.5	28
3.5.1	28
3.5.2	29
3.5.3	29
3.6	31
4	32
4.1	32
4.1.1	34
4.2	34
4.2.1	34
4.2.2	34
4.3	35
4.3.1	35
4.3.2	35
4.3.2.1	35
4.3.2.2	36

4.3.3	Festlegung von objektspezifischen Bemessungsbränden für spezielle Brandobjekte	36
4.4	Bemessungsbrände für die Brandausbreitungsphase	36
4.4.1	Brandszenario und Brandschutzaspekte	36
4.4.1.1	Bedeutung der Brandausbreitungsphase für die Brandsicherheit	37
4.4.1.2	Flash-over	37
4.4.1.3	Begrenzung der Wärmefreisetzung durch fehlende Verbrennungsluft	38
4.4.2	Normative Bemessungsbrände	38
4.4.2.1	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung bei geringer Bestimmtheit der Brandbedingungen mit normativen Ansätzen	39
4.4.3	Objektspezifische Beschreibung der zeitlichen Brandentwicklung	41
4.4.3.1	Brandszenario und Brandschutzaspekte	41
4.4.3.2	Bemessungsbrände aufgrund von objektspezifischen Brandversuchen	41
4.4.3.3	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung mit hoher Bestimmtheit der Brandbedingungen bei gleichmäßiger, radialer Brandausbreitung	42
4.4.3.4	Hinweise zur Bewertung von linearen Brandausbreitungen	42
4.4.4	Bemessungsbrände für Brände nach dem Wirksamwerden von Löschmaßnahmen	43
4.4.4.1	Einfluss von Löschmaßnahmen auf die Entwicklung eines Bemessungsbrandes	43
4.4.4.2	Bemessungsbrände bei Wirksamwerden von Löschmaßnahmen der Feuerwehr	44
4.4.4.3	Bemessungsbrände bei Wirksamwerden von automatischen Löschanlagen	44
4.5	Bemessungsbrände für die Vollbrandphase	45
4.5.1	Brandszenario und Brandschutzaspekte	45
4.5.2	Normativ festgelegte Bemessungsbrände ohne Berücksichtigung der Brandparameter	46
4.5.3	Normativ festgelegte Bemessungsbrände mit Berücksichtigung der Brandparameter	47
4.5.3.1	Bemessungsbrände nach DIN 18230-1	47
4.5.3.2	Zeitunabhängige Brandverläufe für spezielle Nutzungseinheiten	47
4.6	Abklingphase	48
4.7	Literatur	48
	Anhang zu Kapitel 4	52
5	Modelle für die Brandsimulation	64
5.1	Zielsetzung der Brandmodellierung	64
5.2	Überblick über die verfügbaren Brandmodelltypen	65
5.2.1	Einleitung	65
5.2.2	Mathematische Modelle	65
5.2.3	Physikalische Modelle	67
5.2.4	Grundlegende Vorgaben	67
5.3	Beschreibung der mathematischen Modelle	68
5.3.1	Empirische Korrelationen	70
5.3.2	Vollbrandmodelle	80
5.3.3	Zonenmodelle	84

5.3.4	Feldmodelle (CFD)	89
5.4	Beschreibung der Physikalischen Modelle	94
5.4.1	Allgemeines	94
5.4.2	Modellgesetzmäßigkeiten (Ähnlichkeitskriterien)	95
5.4.3	Besonderheit der Windkanaluntersuchungen	96
5.4.4	Geometrischer Modellmaßstab und Modellgestaltung	97
5.4.5	Umrechnung physikalischer Größen (Ähnlichkeitsfaktoren)	98
5.4.6	Merkmale des Realbrandes und seine Umsetzung im Modell	99
5.4.7	Objektspezifische Abnahmeversuche (M 1:1)	100
5.4.8	Vergleichsuntersuchungen	101
5.4.9	Zusammenfassung	101
5.5	Kriterien für die Modellbewertung	105
5.5.1	Allgemeines	105
5.5.2	Typische Anwendungsfälle und Vergleichsrechnungen	107
5.5.2.1	Plume-Temperatur	107
5.5.2.2	Beispiele und Experimente für Vergleichsrechnungen	109
5.6	Modellanwendung	116
5.6.1	Auswahl der Szenarien	116
5.6.2	Auswahl des Modelltyps	117
5.6.3	Interpretation der Ergebnisse	118
5.6.4	Anforderungen an die Dokumentation	119
5.7	Literatur	120
	Anhang zu Kapitel 5	124
6	Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken	125
6.1	Nachweisverfahren	125
6.2	Anwendungsbereiche	125
6.3	Begriffe für Bauteil- und Tragwerksnachweise	128
6.4	Nachweise nach DIN 4102 Teil 4	130
6.4.1	Grundlagen	130
6.4.2	Brandschutztechnische Bemessung	131
6.5	Nachweise nach den Brandschutzteilen der Eurocodes	132
6.5.1	Allgemeines	132
6.5.2	Nationale Anwendungsdokumente (NAD)	133
6.5.3	Tabellarische Daten	134
6.5.4	Vereinfachte Rechenverfahren	135
6.5.5	Allgemeine Rechenverfahren	138
6.5.5.1	Allgemeines	138
6.5.5.2	Thermische Analyse	139
6.5.5.2.1	Thermische Einwirkungen	139
6.5.5.2.2	Temperaturverteilung im Bauteil	141
6.5.5.3	Mechanische Analyse	144
6.5.5.3.1	Mechanische Einwirkungen	144
6.5.5.3.2	Bauteil- und Tragwerksanalyse	147
6.5.5.4	Abnehmende Bauteiltemperaturen	151

6.6	Beurteilung von Rechenprogrammen	156
6.6.1	Allgemeines	156
6.6.2	Programmverifikation	156
6.6.3	Validierung	157
6.6.4	Testen durch Eichbeispiele	157
6.6.5	Toleranzen	158
6.6.6	Prüfprotokoll	158
6.7	Industriebau – Nachweis nach DIN 18230 Teil 1	159
6.8	Zusammenfassung	161
6.9	Literatur	162
7	Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz	165
7.1	Wirkung von anlagentechnischen und abwehrenden Maßnahmen auf das Brandszenario	165
7.1.1	Allgemeines	165
7.1.2	Wirkung von Brandmeldeanlagen	166
7.1.3	Wirkung von Löschanlagen	168
7.1.4	Wirkung von Rauch- und Wärmeabzügen	170
7.1.5	Wirkung von abwehrenden Brandschutzmaßnahmen	171
7.2	Brandmeldeanlagen	173
7.2.1	Allgemeines	173
7.2.2	Zuverlässigkeit von Brandmeldeanlagen	175
7.2.3	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Brandmeldeanlagen	176
7.3	Löschanlagen	176
7.3.1	Arten und Einsatzfelder	176
7.3.2	Projektierung von Löschanlagen	177
7.3.3	Zuverlässigkeit von Löschanlagen	178
7.3.4	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Sprinkler	180
7.4	Rauch- und Wärmeabzugsanlagen	181
7.4.1	Allgemeines	181
7.4.2	Zuverlässigkeit von RWA	182
7.4.3	Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch RWA	182
7.5	Abwehrender Brandschutz	182
7.5.1	Alarmierungszeit	182
7.5.2	Hilfsfrist	183
7.6	Literatur	185
	Anhang zu Kapitel 7	188
8	Personensicherheit in Rettungswegen	191
8.1	Optische Rauchdichte	191
8.2	Sichtweite	192
8.3	Die toxische Wirkung von Brandgasen	193
8.4	Die thermische Wirkung von Brandgasen	195
8.5	Literatur	198

9	Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren	200
9.1	Einleitung	200
9.2	Berechnung von Räumungszeiten	200
9.3	Reaktionszeiten	201
9.4	Entfluchtungsmodelle	205
9.4.1	Abschätzung von Räumungszeiten durch Handrechnungen	206
9.4.2	Dynamische Strömungsmodelle und Netzwerkmodelle	208
9.4.3	Individualmodelle	210
9.4.4	Modellauswahl und Anwendungsgrundsätze	211
9.4.5	Validierung	212
9.5	Verhaltensaspekte	212
9.6	Personenzahl	214
9.7	Literatur	216
10	Sicherheits- und Risikobetrachtungen	218
10.1	Allgemeines	218
10.2	Unsicherheiten bei Nachweisen mit Ingenieurmethoden	219
10.2.1	Streuungen der Modellgrößen	219
10.2.2	Ausfallwahrscheinlichkeiten von Brandschutzmaßnahmen	220
10.2.3	Unsicherheiten der verwendeten Modelle	220
10.3	Festlegung von Zielversagenswahrscheinlichkeiten und Risikoklassen	221
10.3.1	Allgemeines	221
10.3.2	Schutzziel und Grenzzustand (R_1)	221
10.3.3	Versagensart (R_2)	222
10.3.4	Fluchtmöglichkeiten der Nutzer (R_3)	222
10.3.5	Rettungsmöglichkeiten der Feuerwehr (R_4)	223
10.3.6	Bedeutung des Gebäudes (R_5)	223
10.3.7	Zu erwartender wirtschaftlicher Schaden (R_6)	224
10.4	Probabilistische Brandschutzbemessung	224
10.5	Brandschutztechnische Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten	226
10.6	Annahmen für die Herleitung der Teilsicherheitsbeiwerte	231
10.7	Zusammenfassung	232
10.8	Literatur	233
Anhänge		
A.1	Bezeichnungen und Symbole	234
A.2	Anwendungsbeispiele	244

VORBEMERKUNG

Das vfdb-Referat 4 „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ hat sich zum Ziel gesetzt, die in den letzten 10 bis 15 Jahren entwickelten modernen Ingenieurmethoden des Brandschutzes aufzubereiten und in diesem Leitfaden zur Verfügung zu stellen. Darin werden die für die Praxis des vorbeugenden Brandschutzes in Deutschland bedeutsamen ingenieurmäßigen Nachweise zusammenfassend beschrieben und sachgerechte Anwendungen anhand typischer Beispiele erläutert. Der Leitfaden soll 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) unterstützte die Erarbeitung des Leitfadens in begrenztem Umfang durch eigene Mittel und eingeworbene Mittel aus der Wirtschaft. Damit wurden die den Rahmen der normalen ehrenamtlichen Referatsarbeit sprengenden aufwändigen Vergleichsrechnungen zur Überprüfung von Ingenieurmethoden und die Erarbeitung von praxisrelevanten Anwendungsbeispielen überhaupt erst ermöglicht. Außerdem bietet die vfdb auf ihren Internationalen Brandschutz-Symposien (IBS) ein Forum, 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 Leitthema „Performance Based Codes“ vorgestellt und diskutiert. Ein Abgleich der im Leitfaden empfohlenen Ingenieurmethoden mit Empfehlungen und Richtlinien im Ausland wird auf dem 10. IBS im Juni 2005 im Rahmen der INTERSCHUTZ in Hannover unter dem Titel „Fire Safety Engineering“ erfolgen.

Die Kapitel des Leitfadens sind das Ergebnis von Beiträgen zahlreicher Mitarbeiter und intensiver Beratungen in den Arbeitsteams und Ad hoc-Arbeitsgruppen sowie im ständigen Arbeitskreis des Referats 4. Stellvertretend seien hier die Federführenden der Arbeitsteams und Ad hoc-Gruppen genannt, in deren Verantwortung einzelne Kapitel erstellt wurden:

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

Eine Liste aller beteiligten Referatsmitglieder und externen Experten in den Arbeitsteams und Ad hoc-Gruppen findet sich im Internet unter: <http://www.vfdb.de/index.php?content=referat4>

1 KONZEPT UND ANWENDUNG DES LEITFADENS

1.1 Konzept und Aufbau

Der Leitfaden lehnt sich an die Technischen Berichte ISO TR 13387 Part 1 - 8 an, die vom ISO TC 92 Subcommittee 4 „Fire Safety Engineering“ erarbeitet und im Juni 1999 veröffentlicht wurden:

TR 13387-1: The application of fire performance concepts to design objectives

TR 13387-2: Design fire scenarios and design fires

TR 13387-3: Assessment and verification of mathematical fire models

TR 13387-4: Initiation and development of fire and generation of fire effluents

TR 13387-5: Movement of fire effluents

TR 13387-6: Structural response and fire spread beyond the enclosure of origin

TR 13387-7: Detection, activation and suppression

TR 13387-8: Life safety, Occupant behaviour, location and condition.

Wer Ingenieurmethoden im Rahmen der Erstellung oder Überprüfung eines Brandschutzkonzeptes anwenden möchte, findet in dem Leitfaden Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Methoden und Eingangsdaten, mit denen angemessene Brandschutzlösungen entwickelt und nachgewiesen werden können. Der Leitfaden ist kein Lehrbuch und stellt auch kein allgemeingültiges Musterbrandschutzkonzept dar. Er beschreibt in 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 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 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 Schutzziele des Brandschutzes zuverlässig erreicht werden.

Bild 1.1 gibt einen Überblick über den Einsatzbereich von Ingenieurmethoden im Rahmen der brandschutztechnischen Auslegung von Gebäuden anstelle der klassischen Auslegung durch Einhaltung materieller bauordnungsrechtlicher Vorschriften.

1 Konzept und Anwendung des Leitfadens

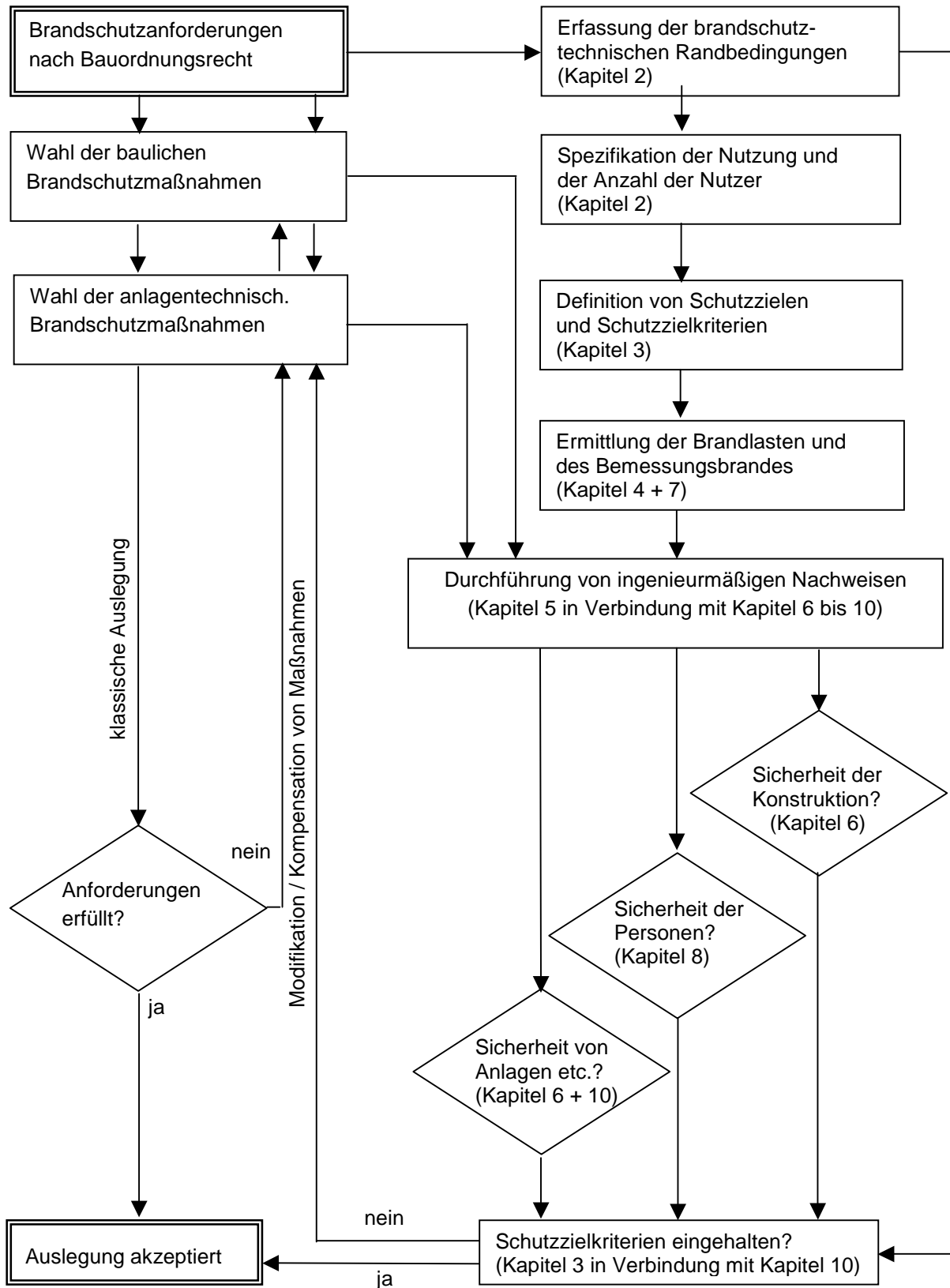


Bild 1.1 Einsatzbereich von Ingenieurmethoden (rechter Bildteil) im Vergleich zu der klassischen Vorgehensweise (linker Bildteil) bei der brandschutztechnischen Auslegung von Gebäuden - Vorgehensweise bei Anwendung des Leitfadens

1.2 Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Anwendung

Die Bearbeitung eines konkreten Projektes mit Hilfe des Leitfadens erfolgt in mehreren Arbeitsschritten:

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

Die mit Ingenieurmethoden ermittelten Ergebnisse dienen in erster Linie zur Sicherstellung der Flucht und Rettung von Personen aus einem Gebäude entsprechend den gesetzlichen Vorgaben, z. B. in der MBO. Sie können im Einzelfall aber auch wichtige Aussagen zum Umweltschutz und zum Sachschutz bzw. Objektschutz liefern.

Der Leitfaden kann für alle Gebäude besonderer Art oder Nutzung angewendet werden. Grundsätzlich kann der Leitfaden auch auf Gebäude oder Nutzungen angewendet werden, in denen besondere Güter gelagert werden, wie z. B. Gefahrstofflager oder Hochregallager, sofern nicht zusätzliche den Brandschutz betreffende Richtlinien die Anwendung einschränken. Beispiele für derartige Richtlinien sind:

- Hochregallager (VDI Richtlinie 3564-Entwurf)
- Leitfaden Brandschutz in Chemikalienlagern (in Vorbereitung)
- Leitfaden: Auswirkungen von Bränden in Pflanzenschutzmittellagern (IVA)
- IPS-Leitlinie: Brandschutz in Pflanzenschutzmittellagern.

Der Anwender findet Hinweise und Beispiele für die Auswahl sachgerechter Berechnungsverfahren und die Interpretation der Berechnungsergebnisse. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, dass 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 Gebäudeart und Nutzung sowie des ungewissen Verhaltens von Personen unterschiedlichste Brandszenarien denkbar. Da keine für alle Gebäude gültigen Vorgaben für die Berechnungen gemacht werden können, müssen im ersten Arbeitsschritt repräsentative Brandszenarien erarbeitet werden, die alle denkbaren Situationen abdecken.

Dies geschieht in einer qualitativen Analyse, bei der sich zweckmäßigerweise die am Bau Beteiligten (Bauherr, Planer, Brandschutzingenieur, genehmigende Behörde, Feuerwehr) gemeinsam über die allgemeinen und ggf. speziellen Schutzziele (z. B. Fluchtzeiten) für das Gebäude verständigen und grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten skizzieren. Die zugehörigen Randbedingungen des Gebäudes und der Nutzung sind dann im Detail zu erfassen und

als Eingabegrößen für die anschließende quantitative Analyse zu dokumentieren, insbesondere:

- Gebäudekonzept (Gebäudekonstruktion und Baustoffe, Unterteilung in Brandabschnitte, Anordnung und Abtrennung der Rettungswege)
- Art der Nutzung (Brandlasten, Nutzer, ggf. Nutzungsänderungen)
- Infrastruktur (anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen, Vorkehrungen für den abwehrenden Brandschutz)
- Brandszenarien (mögliche Brandorte und Brandausbreitung, Randbedingungen des Brandverlaufs).

1.4 Quantitative Analyse

Die in der qualitativen Analyse definierten Schutzziele und Brandszenarien und die ermittelten Randbedingungen bilden nun die Basis für die quantitative Untersuchung verschiedener Teilprobleme mit Hilfe von Ingenieurmethoden. Im Leitfaden werden nach einer Übersicht über die generelle Vorgehensweise (Kap. 1) und einer Anleitung zur Erfassung und Dokumentation der o. g. Randbedingungen des Gebäudes und der Nutzung (Kap. 2) Grundlagen und Anwendungsbeispiele für folgende, häufig vorkommende Fragestellungen bereitgestellt:

- Schutzziele (Kap. 3)
- Brandszenarien und Bemessungsbrände für brandschutztechnische Nachweise (Kap. 4)
- Nachweisverfahren für Brandwirkungen einschließlich der Rauchausbreitung und Rauchableitung (Kap. 5)
- Brandschutztechnische Nachweise für Bauteile und Tragwerke (Kap. 6)
- Nachweise für anlagentechnische und abwehrende Brandschutzmaßnahmen (Kap. 7)
- Nachweise zur Personensicherheit und zu den Rettungswegen (Kap. 8 und 9)
- Differenzierte Sicherheitsanforderungen für unterschiedliche Risiken (Kap. 10).

Die Berechnungsverfahren reichen von komplexen Simulationsmodellen (z. B. CFD-Modell zur Berechnung der Rauchausbreitung in Gebäuden) bis zu einfachen Grund- oder Näherungsgleichungen (z. B. Plume-Formeln für lokal begrenzte Brände). 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 auf die Absicherung (Validierung) durch relevante Brandversuche und auf Anwendungsgrenzen gegeben. Die für den Anwender wesentlichen Berechnungsergebnisse, ihre Unschärfen und bestehende Interpretationsspielräume werden erörtert. Im Anhang des Leitfadens werden typische Anwendungsbeispiele nach der empfohlenen Vorgehensweise untersucht und Ergebnisse diskutiert, die auch für andere Anwendungen von Interesse sein können.

Viele Parameter sind zeitabhängig zu untersuchen, d. h. Rechenergebnisse für eine Fragestellung können zugleich Eingangsgrößen für eine im Brandverlauf später auftretende Fragestellung sein. Die Abhängigkeiten der physikalischen Eingangs- und Ausgangsgrößen werden daher in einer Matrix dargestellt, um die erforderlichen Daten für eine konsistente Gesamtbewertung eines Gebäudes zutreffend auswählen zu können.

Die Verantwortung für die Auswahl eines angemessenen Berechnungsverfahrens und der zugehörigen Eingangsdaten liegt beim Brandschutzingenieur. Wenn für die Fragestellung unvollständige Eingangsgrößen oder nicht hinreichend abgesicherte Berechnungsverfahren vorliegen, muss er auf der sicheren Seite liegende Annahmen treffen oder ggf. sogar den Nachweis durch einen Real- oder Modellversuch führen.

1.5 Vergleich mit den Schutzziele und Ableitung von Maßnahmen

Die Vorgaben zu den Schutzziele und den Brandszenarien aus der qualitativen Analyse sind mit den Ergebnissen der quantitativen Analysen zu den für das Objekt wesentlichen Fragestellungen zu vergleichen. Hieraus sind Schlussfolgerungen für die risikogerechte brandschutztechnische Auslegung des Gebäudes zu ziehen und mit den am Verfahren Beteiligten abzustimmen. Sofern keine Übereinstimmung mit den definierten Schutzziele erzielt werden kann, muss die Vorgehensweise wiederholt werden, indem z. B. zusätzliche kompensatorische Maßnahmen ergriffen oder bauliche Änderungen vorgenommen werden.

Im Rahmen des Leitfadens sind die in den bauordnungsrechtlichen Vorschriften entweder nicht explizit oder nur qualitativ-verbal vorgegebenen Schutzziele in entsprechende Schutzzielkriterien zu übersetzen, die in der quantitativen Analyse als Grenzwerte, z. B. für die Beanspruchbarkeit eines Bauteils oder die Belastbarkeit einer Person durch CO-Konzentration im Rauch, verwendet werden. Solche Schutzzielkriterien werden im Grundsatz in Kapitel 3 und dann problembezogen in den Kapiteln 6 bis 8 genannt.

Je nach Fragestellung müssen unterschiedliche Brandszenarien hergeleitet werden, die realistisch oder auf der sicheren Seite liegend die Brandgefährdung in dem Gebäude erfassen. In der Regel sind zwei Fälle zu bewerten:

Brandentwicklung und Brandwirkungen im Brandraum selbst als Basis der Rauchausbreitung und thermischen Belastung von Bauteilen und

Brandausbreitung über den Brandraum hinaus als Basis der Rauchausbreitung und -ableitung und thermischen Belastung von Bauteilen.

Bei der Simulation eines Brandes mit einem Modell spielen folgende Parameter eine Rolle: Wärmestrahlung, Wärmetransport (konvektiv und konduktiv), Brandausbreitung, Abbrand, Ventilation, Energiefreisetzung, Rauchausbeute, Verbrennungsprodukte (Kapitel 4). Die Parameter können durch die anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen (Kapitel 7) beeinflusst werden. Unter Einbeziehung dieser physikalischen Größen lassen sich die Grenzzustände, die den einzelnen Schutzziele zugeordnet sind, analysieren. Dazu werden in Kapitel 5 die Brandwirkungen ermittelt, die einerseits für Grenzzustände der Tragfä-

higkeit im Brandfall gemäß Kapitel 6 und andererseits für Grenzzustände der Personengefährdung in Kapitel 8 benötigt werden.

Da der Anwendungsbereich eines Leitfadens in der Regel für Gebäude besonderer Art oder Nutzung Verwendung finden soll, bei denen die allgemeinen Schutzziele des Baurechts nicht immer eindeutig umzusetzen sind, gibt der Leitfaden Hinweise, durch welche Ertüchtigungsmaßnahmen nicht direkt erfüllbare Forderungen des Baurechts kompensiert werden können, ohne das Sicherheitsniveau zu verringern. Teilweise werden in den Landesbauordnungen bzw. den zugehörigen Durchführungsverordnungen sowie in Richtlinien und Verordnungen für Sonderbauten bereits mögliche kompensatorische Maßnahmen genannt, die in der Genehmigungspraxis akzeptiert wurden. Im Leitfaden werden sinnvolle Kompensationsmaßnahmen grundsätzlich aus ingenieurmäßigen Nachweisen abgeleitet und begründet. Sie betreffen vor allem:

- die Kompensation von Abweichungen bei baulichen Abtrennungen von Brandbereichen
- die Kompensation von Abweichungen bei Rettungswegen.

1.6 Darstellung 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
- Vergleich der rechnerischen Analyse mit den geforderten Schutzzielen
- Empfehlungen für die baulichen Brandschutzmaßnahmen
- Empfehlungen für die anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen
- Empfehlungen für die organisatorischen Brandschutzmaßnahmen beim Betrieb des Gebäudes, z. B. Auflagen, Betriebsanweisungen, Management

2 ERFASSUNG DES GEBÄUDES

2.1 Allgemeines

Bevor eine Bewertung für ein Gebäude aus brandschutztechnischer Sicht entsprechend dem vorliegenden Leitfaden vorgenommen werden kann, ist es notwendig, alle Informationen zusammenzutragen. Daraus kann auf der Grundlage ingenieurmäßiger Ansätze die quantitative Analyse durchgeführt werden. Dabei ist es wichtig, dass alle Informationen, die als Eingangsgrößen für die Berechnungen benötigt werden, bereitgestellt werden müssen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich

- der Gebäudestrukturen
- des Gebäudeinhalts
- der Umgebungseinflüsse
- der Nutzer.

Die Informationen bestehen teilweise aus festen Vorgaben zum Gebäude wie z. B. Abmessungen, angrenzende Bebauung und Art der Nutzung oder müssen im Rahmen der qualitativen Analyse vorgegeben werden wie z. B. Aufteilung des Gebäudes in Abschnitte, Lüftung / Rauchableitung oder Art der verwendeten Materialien.

2.2 Gebäudestruktur

Die Gebäudestruktur sollte aus den Zeichnungen des Planer 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,
- Lage und Größe von Treppenträumen, Schleusen (Vorräume) Ausbildung der Konstruktion und Anbindung an die Nutzung in den einzelnen Ebenen des Gebäudes,
- Anordnung und Verteilung vertikaler und horizontaler Installations- und Lüftungsschächte im Gebäude, deren konstruktive Ausbildung sowie Angaben über die Absperrvorrichtungen in den Übergängen,
- Erschließung des Gebäudes von außen und Erfassung der Fluchtwege (Flure) im Gebäude (Fluchtweglängen) in sichere Bereiche,
- Unterteilung der Flure in Abschnitte durch automatisch schließende Türen (Begrenzung der Rauchausbreitung)

- Erfassung von Feuerwehraufzügen, Vorräume 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,
- Thermische Eigenschaften (Dichte, Wärmeleitung und Wärmekapazität) der verwendeten Wandmaterialien sowie deren Baustoffklassifizierung.

Weitere Angaben hinsichtlich der Gebäudesicherheit sind zu erfassen:

- Voraussetzungen für eine Wasserversorgung des Gebäudes,
- Anzahl und Lage der Steigleitungen (trocken oder nass) im Gebäude sowie der Hydranten außerhalb des Gebäudes,
- Bereiche mit Branddetektoren wie z. B. Melder, die auf Rauch, Hitze oder Flammen ansprechen und Alarmsysteme, die akustisch wirken,
- Bereiche mit automatischen Sprinklern,
- Bereiche mit automatischen Systemen zur natürlichen Rauchableitung (vertikal bzw. horizontal),
- Bereiche mit maschineller Rauchableitung,
- Bereiche mit Druckbelüftung wie Treppenträume, Schleusen oder Feuerwehraufzüge.

Die aufgeführten Angaben stellen eine Übersicht dar und müssen – soweit zutreffend – bezogen auf das Gebäudekonzept im Einzelnen ermittelt werden.

2.3 Gebäudeinhalt

Die Erfassung des Gebäudeinhaltes ist eine der Grundlagen zur Bewertung eines Gebäudes, da die vorhandene Brandlast in einem Abschnitt sowohl die Dauer als auch die Heftigkeit eines Brandes beeinflusst. Die Daten über Brandlasten sind notwendig, um die erforderlichen Feuerwiderstandsdauern der Umfassungsbauteile im Brandbereich ermitteln oder ggf. eine Brandausbreitung über den Brandraum hinaus erfassen zu können. Die Art und Verteilung der Brandlast ist neben den Ventilationsbedingungen des Brandabschnittes bestimmend für die Heftigkeit eines Brandes. Daraus ergeben sich die Menge und die 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 die Kontaminierung von Rauch und korrosiven Gasen entstehen.

Im Rahmen der internationalen Arbeitsgruppe CIB W 14 wurden Erhebungen über die mittlere Brandlastdichte in Gebäuden mit unterschiedlichen Nutzungen durchgeführt (vgl. Anhang zu Kapitel 4, Tabelle A4.1). Diese Brandlastdichten werden in MJ/m^2 angegeben und können

in Holzvergleichsbrandlasten 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 mittleren Werten abweichen und ist daher direkt vor Ort zu ermitteln. Ist das zu untersuchende Gebäude erst in der Planungsphase, sind Untersuchungen an vergleichbaren Gebäuden mit vergleichbarer Nutzung durchzuführen, wobei mindestens fünf verschiedene Gebäude in die Untersuchungen mit einbezogen werden sollten.

Für die direkte Ermittlung der Brandlastdichte q (in MJ/m^2) müssen die Mengen M (in kg) der gelagerten bzw. genutzten brennbaren Materialien in dem zu untersuchenden Abschnitt (Fläche A_f in m^2) bestimmt werden. Zusätzlich sind die Heizwerte H_u (in MJ/kg) für jedes Material zu bestimmen. Dies kann im Einzelfall durch Messungen erfolgen, weiterhin sind in der Literatur Heizwerte für gängige Materialien vorhanden (siehe DIN 18230 Teil 3).

Die Brandlastdichte ermittelt sich zu:

$$q = \frac{\sum (M_i \cdot H_{ui})}{A_f} \quad (2.1)$$

Bei einem realen Brand werden nicht alle Materialien vollständig umgesetzt. Dies hängt von der Art und Verteilung der Materialien ab. Bei der Festlegung eines an die Nutzung angepassten Feuerszenarios entsprechend Kapitel 4 unter Verwendung der ermittelten Brandlastdichte ist ggf. ein Verbrennungskoeffizient zu berücksichtigen. Nach internationalen Untersuchungen liegt der Wert bei 0,8, womit die maximal mögliche Energiefreisetzung verringert wird.

Nach DIN 18230 wird bei der Festlegung eines Auslegungsbrandes die Lagerart und Lagerdichte der Materialien berücksichtigt. Dies erfolgt durch den m -Faktor, der ein Maß für das Brandverhalten des Materials unter den real vorliegenden Bedingungen darstellt.

2.4 Umgebungseinflüsse

Die angrenzende Bebauung und die daraus entstehenden Einflüsse auf das Gebäude können von Bedeutung sein für die Auslegung und Dimensionierung von natürlichen Rauchabzügen. In der Regel sind die Einflüsse aus brandschutztechnischer Sicht als gering einzustufen. Bei einer Analyse sind der Einfluss des Windes und seine Richtung auf das Gebäude, die Temperaturverteilungen (äußere und innere), Schneelasten sowie Luftbewegungen im Gebäude zu berücksichtigen.

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. Die Berechnung des Winddruckes erfolgt nach DIN 1055 Teil 4. Für die Bestimmung der Windrichtung und seiner Stärke sind die Daten des Wetterdienstes für das betroffene Gebiet heranzuziehen, und nach der Häufigkeit und Heftigkeit verteilt über das ganze Jahr auszuwerten. Der Windeinfluss ist von

entscheidender Bedeutung für die Anordnung und Lage von natürlichen Rauch- und Wärmeabzügen im Gebäude.

Sofern es für die brandschutztechnische Auslegung von Bedeutung ist, muss mit äußeren Temperaturen zwischen -20 °C und $+30\text{ °C}$ im Bereich der Bundesrepublik gerechnet werden. Die Temperaturen im Gebäude können je nach Lage sehr unterschiedlich sein. Als Richtwert werden 20 °C verwendet. In großen Abschnitten wie z. B. Atrien können sich über der Höhe bei Sonneneinstrahlung starke Temperaturunterschiede ausbilden. Bei bestimmten Wetterlagen können sich die Temperaturverhältnisse im Atrium so verändern, dass bei geöffneten natürlichen Rauch- und Wärmeabzügen im Dach die aufsteigenden Rauchgase nicht die sich ausgebildete Luftschicht durchstoßen können (Inversionswetterlage im Gebäude). Dies ist bei der Auslegung der natürlichen Rauchableitung für die einzelnen Abschnitte zu berücksichtigen. Hierzu sind detaillierte Erhebungen durch die Haustechnik erforderlich.

Schneelasten und Eis können die Funktionsfähigkeit von Rauch- und Wärmeabzügen im Dach behindern bzw. bei automatischer Auslösung zu Zeitverzögerungen führen. Klassifizierte Geräte haben den Nachweis unter Schneelasten geführt.

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

2.5 Nutzer

Bei der Entstehung der qualitativen Analyse für das Gebäude steht die Sicherstellung der Flucht und Rettung von Personen im Vordergrund. Um dies umzusetzen, ist eine vertiefte Kenntnis über die Personen und deren Verhalten im Gebäude notwendig. Die Anzahl der Personen und das Verhalten der Nutzer im Gefahrenfall beeinflussen die Fluchtzeiten aus dem Gebäude. So bemerken häufige Nutzer im Gebäude ein Feuer zuerst und lösen einen Alarm aus. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Nutzer den Alarm auslöst, wird durch unterschiedliche individuelle Faktoren beeinflusst wie:

- Vertrautheit mit dem Gebäude: Dies sind Personen, die sich in dem betroffenen Gebäude täglich aufhalten und die örtlichen Gegebenheiten kennen und die zusätzlich vertraut sind mit den Sicherheitsanforderungen an das Gebäude. Dieser Personenkreis wird im Gefahrenfall den kürzesten Weg in sichere Bereiche wählen. Personen dagegen, die sich im Gebäude nicht auskennen, werden häufig den Weg zur Flucht wählen, über den sie das Gebäude betreten haben.
- Aufmerksamkeit: Personen, die ständig in einem Gebäude arbeiten sowie Personen, die z. B. als Kontaktperson für andere Personen dienen (Information), haben in der Regel eine erhöhte Aufmerksamkeit gegenüber sich verändernden Situationen.

- **Mobilität:** Es gibt verschiedene Methoden zu erfassen, wie schnell Personen durch Türen, Flure und Treppenträume gelangen. Die Geschwindigkeit wird dabei beeinflusst durch sehr junge Menschen und Personen in höherem Alter. Weiterhin wird die Geschwindigkeit durch die erhöhte Dichte fliehender Personen in Fluren herabgesetzt. Besonders für kranke Personen, Personen in Rollstühlen oder gehbehinderte Personen sind zusätzliche Anforderungen an den Ausbau des Rettungsweges zu stellen.
- **Soziale Zugehörigkeit:** Personen in Gruppen (Familie oder Besuchergruppen) bleiben in der Regel zusammen und bewegen sich als Gruppe ebenso zum Ausgang. In so einer Gruppe wird eine Feueralarmmeldung häufig früher erkannt, was aber nicht unbedingt zu einer schnelleren Flucht führt. Die Fluchtgeschwindigkeit wird vielmehr durch den Langsamsten der Gruppe bestimmt.
- **Verantwortlichkeit:** Personen, die in einem Gebäude mit einer gewissen Verantwortlichkeit betraut sind, beeinflussen das Verhalten anderer Personen. Durch Hinweise auf Gefahrensituationen werden die Zeiten vor 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).

Die Zeit für die Flucht und Rettung in einem sicheren Bereich unterteilt sich in folgende Abschnitte:

- **Zeit der Branderkennung bis zum Beginn der Fluchtbewegung (pre-movement time).** Sie umfasst die Zeit bis zum Erkennen des Alarms (Feuermeldung) sowie die Zeit nach Erkennen eines Feueralarms, um sich zur Flucht aus dem Gebäude zu entschließen. Sie wird hauptsächlich durch die Wachsamkeit der Personen beeinflusst.
- **Zeit der Flucht vom Standort der Person bis in einen sicheren Bereich (Treppenraum oder das Freie).** Diese Zeit ist abhängig von den individuellen Mobilitätsparametern. Sie hängt ebenso davon ab, wie die Fluchtwege in der Breite dimensioniert sind, um die vorhandene Anzahl von Personen aufzunehmen.

In Kapitel 8 (Personensicherheit) wird das Verhalten der Nutzer erfasst und die Auswirkungen auf die Fluchtmöglichkeiten dargestellt. Evakuierungsmodelle zum Nachweis der Entfluchtung eines Gebäudes werden in Kapitel 9 vorgestellt.

3 SCHUTZZIELE UND SICHERHEITSKRITERIEN

3.1 Allgemeines

Die Brandsicherheit in Gebäuden – insbesondere Gebäuden besonderer Art und Nutzung – ist das 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 eine oder mehrere der vorgenannten 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 des Leitfadens abgeleitet (vgl. auch [3.12]).

Die Schutzziele ergeben sich einerseits aus öffentlich-rechtlichen Vorschriften und andererseits aus privatrechtlichen Vorschriften und privaten Interessen der Besitzer oder Betreiber eines Gebäudes.

Das Erreichen der Schutzziele ist im Rahmen von Brandschutzkonzepten nachzuweisen, die in den Bauordnungen der Länder, z. B. [3.1], neuerdings gefordert werden mit konkreten Vorgaben für deren Inhalt und Gliederung [3.2] (s. Anlage 1). Darin werden auch Rechenverfahren des Brandschutzingenieurwesens unter der laufenden Nummer 18 angesprochen.

Für Sonderbauten wird jetzt unter anderem in [3.1] gefordert:

19. die Pflicht, ein Brandschutzkonzept vorzulegen, und dessen Inhalt,

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 oder abwehrend sichergestellt werden muss.

Die Leistungsfähigkeit der Brandschutzmaßnahmen muss mit den Brandgefahren und Brandrisiken der Gebäude und mit den öffentlich-rechtlichen Brandschutzzielen (in Verbindung mit den konzeptionell verknüpften Brandschutzmaßnahmen) in Einklang gebracht wer-

den. Dabei ist es aus der Sicht der Baugenehmigung wichtig, das erforderliche Brandsicherheitsniveau zu kennen und das vorhandene oder konzeptionell zu genehmigende Brandsicherheitsniveau richtig einschätzen zu können.

Eine schutzzielorientierte Brandschutzbemessung beschränkt sich demzufolge 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 die 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 hier nachfolgend auch der Frage nachgegangen, in wie weit die Fortschreibung des technischen Regelwerkes (DIN-, EN-Normen; andere Bemessungsrichtlinien für Brandschutzmaßnahmen) Leistungsklassen für Brandschutzmaßnahmen fest-schreiben, die nicht mehr unmittelbar mit den bauordnungsrechtlichen Schutzziele im Einklang stehen.

Es soll bereits eingangs klargestellt werden, dass eine „punktgenaue“ Einrechnung aller risikomindernden Faktoren in die Auslegung von Brandschutzkonzepten dazu führen kann, dass dann all diese Annahmen sicherheitsrelevant werden und zu entsprechenden Auflagen meist in Bezug auf die Kontrolle und Einhaltung von betrieblichen Nutzungsfestlegungen führen müssen. Damit kann die Freiheit eines Bauherren eine nicht gewollte Einschränkung erfahren; ferner nimmt die organisatorische Verantwortung des Bauherrn und Betreibers einer baulichen Anlage extrem zu, was in der Regel von den Betrieben kaum geleistet werden will und kann. Hier sind also einer Anrechnung risikomindernder Faktoren in der Praxis recht enge Grenzen gesetzt.

3.2 Brandrisiken, Brandszenarien und Schutzziele

Bemessungsbrandszenarien sind unter anderem dadurch charakterisiert, dass sie nicht jedes denkbare oder geschehene Brandereignis auf der sicheren Seite mit abdecken oder einschließen müssen, sondern sie grenzen den abzusichernden Bereich von dem Bereich der akzeptierten Restrisiken ab. Insofern sind Brandszenarien in Verbindung mit Bemessungsbränden ein Bekenntnis zu einem ganz bestimmten Sicherheitsniveau und damit gleichzeitig auch zu einem ganz bestimmten, akzeptierten Restrisiko.

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

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

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

Demnach lassen sich Risiken systematisch beliebig fein differenzierten Risikoklassen zuordnen (Tabelle 3.1). Große und sehr große Risiken können demnach sowohl durch große Eintrittswahrscheinlichkeiten als auch durch ein großes Schadenpotential begründet sein.

Tabelle 3.1 Beispiel für die Definition von Risikoklassen

Schadenhöhe \ Eintrittswahrscheinlichkeit	Eintrittswahrscheinlichkeit		
	gering	mittel	groß
gering	sehr gering	gering	mittel
mittel	gering	mittel	groß
groß	mittel	groß	sehr groß

Die Übertragung der Sicherheitsphilosophie der Landesbauordnungen für die erforderliche Brandsicherheit der speziellen Risikoverhältnisse von Sonderbauten ist äußerst komplex und zudem meist sehr politischer Natur. Es muss der Nachweis erbracht werden, dass die spezielle Sonderlösung die „allgemeinen Anforderungen“ der LBO in gleicher Weise erfüllt. Es gilt der Grundsatz: Höhere Risiken müssen durch mehr oder bessere Maßnahmen auf das übliche Risikoniveau gemindert werden; dagegen wird im Allgemeinen nicht gefordert, höhere Risiken durch ein Bündel hochwertiger Schutzmaßnahmen unter das übliche, akzeptierte Restrisiko zu senken.

LBO-NW: § 3(1) „Bauliche Anlagen sowie andere Anlagen und Einrichtungen im Sinne von § 1 Abs. 1 Satz 2 sind so anzuordnen, 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.“

Grundsätzlich können drei Klassen von Ereignissen unterschieden werden:

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

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

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

3.3 Schutzinteressen und Schutzziele

3.3.1 Schutzinteressen

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

- Leben und Gesundheit von Menschen,
- Leben und Gesundheit von Tieren,
- Schutz von bestimmten Sachwerten,
- Schutz der Umwelt
 - Luft (Brandgase)
 - Wasser (Löschwasser)
 - Erdreich (Löschwasser)
 - Vermeidung von Brandschutt
- Einsatzmöglichkeiten und Sicherheit der Feuerwehren:
 - Einsatzgrenzen der Feuerwehren ergeben sich aus beschränkten personellen und materiellen Ressourcen und aus dem Umstand, dass – erfahrungsgemäß – nur Brände bis zu einer Brandfläche von etwa 400 m² durch einen Innenangriff erfolgreich bekämpft werden können.
 - Persönliche Sicherheit der an Brandbekämpfungs- und Rettungsaktionen beteiligten Personen.

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

- **Versicherbarkeit:**

Das bei Einhaltung von baurechtlichen 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
- Vermeidung von Betriebsunterbrechungen (Nutzungsausfall und Lieferverzug bedeutet u. a. Kundenverlust)
- Vermeidung von
 - straf- und zivilrechtlicher Haftung, insbesondere der Führungskräfte
 - Umweltproblemen und dadurch negatives öffentliches Image
 - Probleme beim Wiederaufbau, da in vielen Fällen eine Betriebsanlagene-
nehmigung erwirkt werden muss
 - Optimierung der Kosten für die Versicherungsdeckung durch Präventiv-
maßnahmen

3.3.2 Öffentlich-rechtliche Schutzziele

Um die angeführten Interessen zu realisieren bzw. gegen Gefährdung durch Brand- und Explosionsereignisse zu schützen, müssen Schutzziele definiert werden, z. B.

- definierte Zuverlässigkeit der Verhinderung der Brandentstehung
- definierte Begrenzung der Brand- und Rauchausbreitung
- definierte Zuverlässigkeit für die Entdeckung eines Brandes
- definierte Hilfsfrist und Stärke einer Intervention durch die Feuerwehren,
- definierte Zeit der Tragfähigkeit der Baukonstruktion bei bestimmter Brandeinwirkung,
- definierte Raumhöhe, bis zu der eine Verrauchung im Brandfall innerhalb einer bestimmten Zeit erfolgen darf.

Das Schutzziel beschreibt, was technisch erreicht werden soll, während das Schutzinteresse beschreibt, warum etwas erreicht werden soll. In der Regel wird unter Brandschutzgesichtspunkten zwischen Personenschutz und Nachbarschaftsschutz, Umweltschutz und Sachwertschutz unterschieden; eine erste Konkretisierungsstufe dieser Schutzziele könnte nach Tabelle 3.2 erfolgen.

Tabelle 3.2 Beispiel für die Konkretisierung von Schutzzielen [3.10]

Schutz für	Ziel des Brandschutzes
Personen	keine mehrfachen Todesfälle akzeptieren
Sachen	Brände auf Flächen kleiner als 200 m ² begrenzen
Umwelt	keine irreversiblen Schäden an Luft, Wasser und Boden zulassen

Tabelle 3.2 macht deutlich, dass akzeptierte Schadenereignisse vereinbart werden und dass ein Null-Risiko nicht angestrebt werden kann.

Eine nächste Stufe der Konkretisierung von Schutzzielen kann nach Tabelle 3.3 durchgeführt werden.

Tabelle 3.3 Beispiele für die Konkretisierung bauordnungsrechtlicher Schutzziele

Schutzziel	Konkretisierung von Schutzzielen
Der Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen	Rauchfreihaltung für die eigenständige Flucht der Personen (mindestens 10 Minuten)
Rettung von Menschen	Sicherer Aufenthalt in gesicherten Bereichen bis zur Rettung durch die Feuerwehr (mindestens 30 Minuten)
Wirksamer Löschangriff innerhalb eines Gebäudes ohne anlagetechnische Brandschutzmaßnahmen	Standicherheit der Konstruktion mehrgeschossiger Bauten (mindestens 90 Minuten), Rauch- und Wärmeabzug

Für eine wirkungsvolle Risikominderung z. B. durch eine Unterstützung der Selbstrettungsmöglichkeiten oder der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr kommen vor allem Maßnahmen in Betracht, die der Brandentstehung sowie der Entwicklung und Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen.

Hierbei handelt es sich um sogenannte Primärmaßnahmen (gegen die Brandentstehung) und um Sekundärmaßnahmen (Begrenzung der Ausbreitung und Entwicklung eines Schadenfeuers); sie wirken im zeitlichen Vorfeld der baulichen Maßnahmen (Tertiärmaßnahmen), welche vor allem in der Vollbrandphase zur Geltung kommen, wenn die Primär- und Sekundärmaßnahmen versagt haben oder wenn sich das Brandereignis über die Primär- und Sekundärphase hinaus fortentwickelt. Mit den Primär- und Sekundärmaßnahmen wird also im Wesentlichen die Auftretenswahrscheinlichkeit gefährlicher Brandereignisse soweit reduziert, dass die besonderen Risiken der Sonderbauten hinreichend kompensiert (nicht 100 %-ig ausgeschlossen) werden. Zu den Sekundärmaßnahmen gehören u. a. auch Maßnahmen, die speziell die Rauchausbreitung verhindern sollen und die für die Flucht und Rettung sowie für eine wirksame Brandbekämpfung die notwendigen Voraussetzungen schaffen sollen.

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

Beispielhaft ist die Wirkung der verschiedenen Brandschutzmaßnahmen in Bild 3.1 den Brandphasen zugeordnet.

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		
Fluchtwege	Fluchtwege, Rettungswege	Schutzräume	
Feuerlöscher	Hilfsfrist, Feuerlöschanlage, Löschwasserversorgung	Stärke der Feuerwehr, Löschwasserversorgung, Löschwasserrückhaltung	Löschwasserrückhaltung
Fenster / Lüftung / Maschinelle Entrauchung	Rauchabzugsanlagen (MA / NA)	Wärmeabzug	Kaltentrauchung (Rauchverschleppung)
Abschottung (Kapselung von Brandlasten)	Abschottung: Rauchabschnitte	Abschottung (Brandabschnitte)	
	Standicherheit: Einzelbauteile	Standicherheit: Konstruktion	Standicherheit: komplexe Gebäudekonstruktionen
	Funktionssicherheit technischer Einrichtungen		

Bild 3.1 Zuordnung der Schutzwirkungen von Brandschutzmaßnahmen zu den Brandphasen (vgl. Bild 4.1)

3.4 Weitergehende Schutzinteressen

Treten im Einzelfall zu den öffentlich-rechtlichen Schutzinteressen privatrechtliche hinzu, so können weitergehende Anforderungen gestellt werden. Typisch sind die Eigeninteressen eines Anlagenbetreibers, die sich rein sachlich gesehen weitestgehend mit den Interessen der Sachversicherer decken sollten; letztere übernehmen ja vertraglich bestimmte, ausgewählte Risiken der Betreiber. Wenn privatrechtliche Schutzinteressen das Maß für die Sicherheitsbeurteilung bestimmen, dann kann die öffentlich-rechtliche Sicherheitsphilosophie, die vornehmlich den Personenschutz und das Gemeinwohl zum Ziele hat, im erweiterten Rahmen angewendet werden und bei größeren Risiken (Produkt aus der Eintretenswahrscheinlichkeit gefährlicher Brände und dem wahrscheinlichen Höchstschaden) zu Brandschutzkonzepten führen, die mit erhöht zuverlässigen 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 und die entsprechenden Bemessungsbrandszenarien bzw. Bemessungs-

sungsbrände beziehen sich 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 weit überwiegend durch anlagentechnische Maßnahmen herbeigeführt wird; für den unwahrscheinlichen Fall eines System- und Konzeptversagens (Restrisiko) kann dann i. d. R. mit den vorhandenen Maßnahmen des abwehrenden und baulichen Brandschutzes das zu erwartende Brandszenario nicht mehr beherrscht werden.

Anlagentechnische Brandschutzsysteme wie Rauchabzugsanlagen oder Sprinkleranlagen werden konzipiert, um in der Regel sowohl die Schutzziele des Bauordnungsrechts zu erfüllen und gleichzeitig die Schutzinteressen des Betreibers und / oder Versicherers einer baulichen Anlage abzudecken. Insofern wurden technische Regeln entwickelt, die sehr viele und auch ungewöhnliche / seltene Ereignisse (Brandszenarien) beherrschen können; damit liegen die Regelvorgaben für die Bemessung solcher Anlagen eher am technisch Machbaren als an der Grenze der bauordnungsrechtlich erforderlichen Mindestleistungsfähigkeit.

Unter den Aspekten einer genehmigungsrelevanten Auslegung müssen zur Festlegung der Mindestanforderungen an derartige Brandschutzsysteme die verschiedenen Schutzziele auseinanderdividiert werden und entsprechende spezielle Bemessungsbrandszenarien und Leistungsanforderungen / Akzeptanzkriterien entwickelt / vereinbart und angewendet werden.

Während im privatrechtlichen Bereich die Bewertungsmaßstäbe (vertragliche Regelungen in Verbindung mit vereinbarten technischen Regelwerken) im freien Spiel der Kräfte beispielsweise zwischen dem Versicherer und dem Versicherungsnehmer ausgehandelt werden, besteht im öffentlich-rechtlichen Bereich mit den Bauordnungen der Länder eine sehr 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 nach demokratischen Verfahrensregeln unter Beteiligung der betroffenen Verkehrskreise entwickelt worden sind.

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

Als ein Beispiel der aktuellen Schutzzieldiskussion in Verbindung mit der Festlegung entsprechender Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände sei die Fortschreibung der Technischen Regeln für Sprinkleranlagen erwähnt. Als Ersatz für die bestehenden Deutschen Normen werden bei CEN europäische Normen unter anderem auch für Sprinkleranlagen fertiggestellt und dann wahrscheinlich als „eingeführte“ Normen in Deutschland anwendbar sein werden. Bei der Festlegung dieser Auslegungs- und Bemessungsrichtlinie sind allerdings über die Brandszenarien und die Versagenskriterien sowie über die vorhandenen Sicherheitskriterien und -faktoren keine Aussagen gemacht worden. Jetzt ist es eine nationale Aufgabe, dieser europäischen Bemessungsnorm ein nationales Anwendungsdokument an die Seite zu stellen, damit die Schutzziele des deutschen Bauordnungsrechts klar von ande-

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

ren Schutzziele abgegrenzt werden können und somit bestimmte Leistungsstufen für die bauordnungsrechtlich konforme und ausreichende Anwendung dieses Regelwerkes zur Verfügung stehen. Mit der Erarbeitung dieses nationalen Anwendungsdokumentes ist vom Koordinierungsausschuss Brandschutz der Normenausschuss NABau 00.31.00 „Brandschutzingenieurwesen“ beauftragt worden.

Mit diesem Beispiel wird deutlich, wie die Aspekte

- Brandschutzphilosophie und Brandschutzkonzepte
- Schutzinteressen und Schutzziele,
- Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände
- Bemessung und Auslegung von Brandschutzmaßnahmen und letztlich das
- Brandsicherheitsniveau

zusammenwirken und ingenieurgemäß ganzheitlich zu betrachten sind.

Schließlich kommt es auch darauf an, die Brandszenarien von sprinklergeschützten Brandverläufen hinreichend sicher qualitativ und auch quantitativ beschreiben zu können um darauf aufbauend ganzheitliche Brandschutzkonzepte mit den wesentlichen Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussparameter hinreichend zuverlässig zu entwickeln.

3.5 Anforderungen und Kriterien zum Erreichen der Schutzziele

3.5.1 Definition der Schutzziele durch Technische Regeln

Die Legaldefinition der bauordnungsrechtlichen Schutzziele (z. B. § 17 von [3.1]) erfolgt praktisch durch die Einführung bestimmter Technischer Regelwerke zur Ausfüllung der allgemeinen Brandschutzziele, 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.

Zu diesen 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,
- 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 klar genannt sind. Ferner ist mit der Zertifizierung auch die Einhaltung eines Sicherheitskonzeptes für die anerkannten Bauteile, Baustoffe und Bauarten gewährleistet.

Zu den notwendigen Voraussetzungen für die Akzeptanz von Technischen Regeln als Bestandteile einer Legaldefinition von bauordnungsrechtlichen Schutzziele der Brandsicherheit gehören also zwingend die Elemente:

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

3.5.2 Konkrete Anforderungen in den Bauvorschriften

Oft beinhalten die Bauvorschriften keine Schutzzieldefinitionen in Form einer Beschreibung von Brandmodell (Bemessungsbrandszenarium und Bemessungsbrand), Versagensmodell (konkretisiertes Schutzziel / Leistungsanforderung) und Sicherheitskonzept (Sicherheitsfaktoren / Sicherheitsabstand) sondern lediglich konkrete Anforderungen an bestimmte Sicherheitsmaßnahmen.

Welche Schutzziele hinter diesen konkreten Anforderungen im Einzelnen zu sehen sind bleibt dem Anwender der Bauordnungen und der Sonderbauverordnungen oft verborgen; jedenfalls bleibt bei der Suche nach alternativen Lösungen durch andere Maßnahmen der Interpretation dieser Vorschriften eine breite Vielfalt von Möglichkeiten offen. Soll oder muss von solchen Vorschriften abgewichen werden, dann fällt die Suche nach den eigentlichen Zielen oft nicht leicht, um eine adäquate Alternative zu finden.

3.5.3 Anhaltswerte zur Beurteilung der Brandwirkungen und Brandprodukte

Ingenieurgemäße Brandsicherheitsnachweise machen rechnerische Aussagen zum Auftreten bestimmter Brandprodukte und Brandwirkungen auf der Basis von Modellrechnungen in Verbindung mit Vorgaben für den untersuchten Brandverlauf in Form von Brandszenarien und Bemessungsbränden.

Wie letztlich im Rahmen von Genehmigungen zur Sicherstellung der öffentlich-rechtlich erforderlichen Brandsicherheit diese Rechenergebnisse bewertet werden müssen, ist noch nicht abschließend geregelt und wird in der Praxis von Fall zu Fall gemeinsam von dem Brandschutzsachverständigen und den Genehmigungsbehörden entschieden. Wichtig dabei sind Akzeptanzwerte zur Beurteilung der Brandkenngrößen insbesondere für den Personenschutz (siehe Tabelle 3.4 und die zugehörigen Erläuterungen in Kapitel 8).

3 Schutzziele und Sicherheitskriterien

Die in Tabelle 3.4 aufgeführten Anhaltswerte für die quantitative Formulierung von Schutzzielkriterien orientieren sich an den Auswirkungen für eine Person unter starker Belastung und setzen voraus, dass die Schadstoffe CO, CO₂ und HCN gemeinsam in einer für die Beurteilung der Personenbelastung relevanten Weise im Brandrauch vorhanden sind. Falls die Brandrauchzusammensetzung deutlich von den in Tabelle 3.4 aufgeführten relativen Schadstoffkonzentrationen abweicht, sind gegebenenfalls detaillierte Analysen mit den in Kapitel 8 beschriebenen Methoden (z. B. FED-Modell) durchzuführen. Gleiches gilt für eine Beurteilung der Freisetzung toxischer oder reizender Verbrennungsprodukte, die nicht in Tabelle 3.4 aufgeführt sind, für abweichende Expositionszeiten sowie für Personengruppen mit deutlich höheren oder geringeren Belastungswerten.

Die Basis für die Festlegung der schadstoffbezogenen Anhaltswerte in Tabelle 3.4 bildet das FED-Modell, unter Beachtung der Wechselwirkung (z. B. Hyperventilation) aller angegebenen Substanzen. Dadurch ergeben sich für die einzelnen Beurteilungsgrößen Anhaltswerte, die zum Teil deutlich über den Akzeptanzgrenzen für den isoliert auftretenden Schadstoff liegen. Es ist zu beachten, dass bei einem tatsächlichen Brand die lokale Schadstoff- und Sauerstoffkonzentration nicht unabhängig sind, sondern in einem thermodynamischen Zusammenhang stehen. Da aus diesem Grund die Sauerstoffkonzentration – bei Einhaltung der in Tabelle 3.4 angegebenen Schadstoff-Grenzwerte – deutlich über 15 Vol.-% liegt (ein Wert, der für sich alleine genommen bei den hier in Frage kommenden Expositionszeiten zu keinen gravierenden Schäden führt), wird Sauerstoffmangel in Tabelle 3.4 nicht explizit als Beurteilungskriterium aufgeführt.

Tabelle 3.4 Beurteilungsgrößen und Anhaltswerte für quantitative Schutzziele

Beurteilungsgröße	Anhaltswert 30 min Exposition	Anhaltswert 15 min Exposition	Anhaltswert 5 min Exposition
CO-Konzentration	100 ppm	200 ppm	500 ppm
CO ₂ -Konzentration	1 Vol.-%	2 Vol.-%	3 Vol.-%
HCN-Konzentration	30 ppm	40 ppm	55 ppm
Wärmestrahlung	1,7 kW/m ²	2,0 kW/m ²	< 2,5 kW/m ²
Gastemperatur	50 °C	50 °C	60 °C
Rauchdichte D _L	0,1 m ⁻¹ - 0,2 m ⁻¹	0,1 m ⁻¹ - 0,2 m ⁻¹	0,1 m ⁻¹ - 0,2 m ⁻¹
Sichtweite	10 m - 20 m	10 m - 20 m	10 m - 20 m

Bei einer optischen Rauchdichte von 0,1 m⁻¹ und darunter kann im Rahmen eines ingenieurgemäßen Nachweises in der Regel davon ausgegangen werden, dass die Akzeptanzwerte für toxische Verbrennungsprodukte im Rauchgas nicht überschritten werden und auch andere Rauchgasbestandteile (insbesondere auch die Sichtweite beeinflussende Reizgase) unbedenklich sind [3.14, 3.15, 3.16].

Eine Sichtweite von 10 m - 20 m führt, je nach Umgebungsbedingung und Rauchgaszusammensetzung zu einer optischen Rauchdichte im Bereich zwischen 0,4 m⁻¹ und 0,1 m⁻¹.

3.6 Literatur

- [3.1] Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen – Landesbauordnung – (BauO NRW) in der Fassung der Bekanntmachung vom 1. März 2000.
- [3.2] Verordnung über bautechnische Prüfungen (Bau-PrüfVO), GVBl., 20. Februar 2000, Nr. 15, S. 226.
- [3.3] DIN 18230-1. Baulicher Brandschutz im Industriebau – Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Ausgabe Mai 1998.
- [3.4] Muster-Industriebaurichtlinie, verabschiedete Überarbeitung, März 2000.
- [3.5] *WIESE, J.*: Design Fires – eine Grundlage für Brandsimulationen. VdS-Fachtagung Ingenieurgemäße Verfahren, 1996.
- [3.6] *REICHEL, P.; WIESE, J.*: Erstellen von Gesamtbrandschutzkonzepten und deren Bewertung unter Verwendung von ingenieurgemäßen Brandsicherheitsnachweisen. VdS-Fachtagung Ingenieurgemäße 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. 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. vfdb-Jahresfachtagung 2. - 4. Juni 2004 in Essen (in diesem Tagungsband).
- [3.13] *DEHNE, M.*: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig, Heft 169 (2003).
- [3.14] Fire Code Reform Centre, Fire Engineering Guidelines, New South Wales, Australia, 2000.
- [3.15] *SIEGFRIED, W.; WILL, J.*: Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. vfdb-Zeitschrift 3 (2002) 101.
- [3.16] *WILK, E.; LESSING, R.*: Bericht über Untersuchungen zur Bestimmung der Sichtweite und zu Brandgaswirkungen auf den Menschen, Brandschutz Consult Leipzig, 2003.

4 BRANDSZENARIEN UND BEMESSUNGSBRÄNDE

4.1 Allgemeines

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

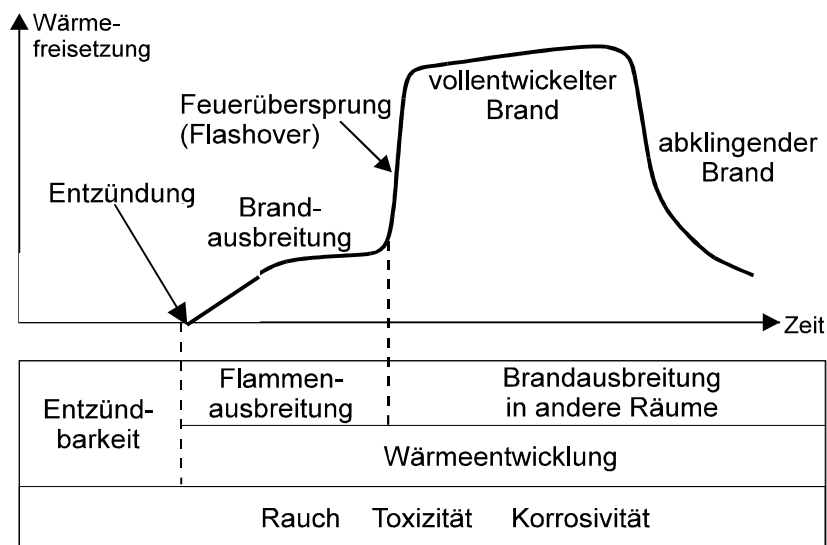


Bild 4.1 Brandentwicklungsphasen

Meist wird die Wärmeentwicklung als wichtigste Informationsquelle herangezogen („rate of heat release -RHR-“). Von der Wärmefreisetzung lassen sich im Regelfall die Entstehung weiterer Brandprodukte und Brandkomponenten ableiten (Bild 4.2).

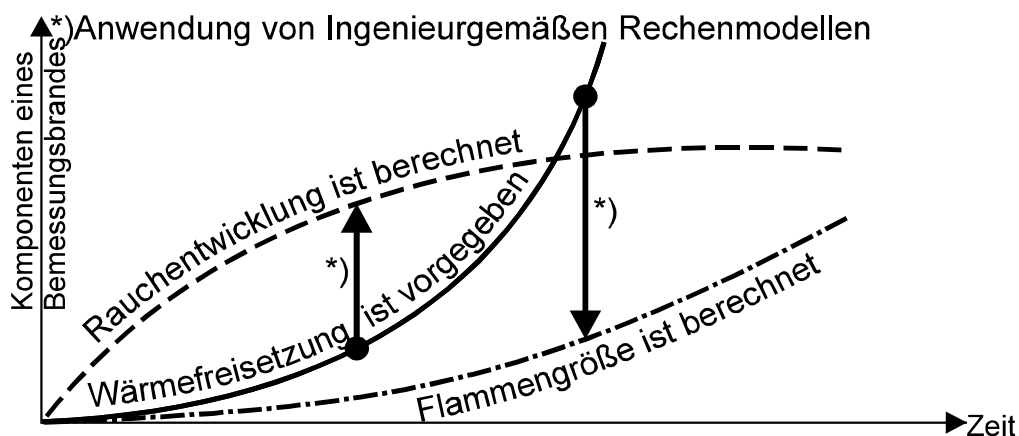


Bild 4.2 Ingenieurgemäße Ermittlung von Brandkenngrößen eines Bemessungsbrandes auf der Basis der angenommenen Wärmefreisetzung

In der Brandschutzpraxis werden allerdings auch häufig bestimmte Brandparameter direkt verwendet – beispielsweise die Temperaturentwicklung 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 Brandschutzingenieurwesens, 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 modernen Brandsimulationen kann die zeitliche Entwicklung wichtiger Brandparameter hinreichend genau abgeschätzt werden. Üblicherweise ist die zentrale Größe für Brandsimulationen nach der Wärmebilanztheorie die Wärmefreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit.

Die Wärmefreisetzungs-/Zeit-Kurve kann auf unterschiedliche Weise gefunden werden, z. B.:

- durch Experimente (ähnliche Brandlast bei ähnlichen Raum- und Ventilationsbedingungen),
- durch Berechnungen,
- durch Vereinbarung auf der Basis von Schadenauswertungen oder anderer Erkenntnisse,
- durch normative Vorgaben (rechtliche oder technische Regelwerke).

Schema: Brandphasen und Brandverlauf

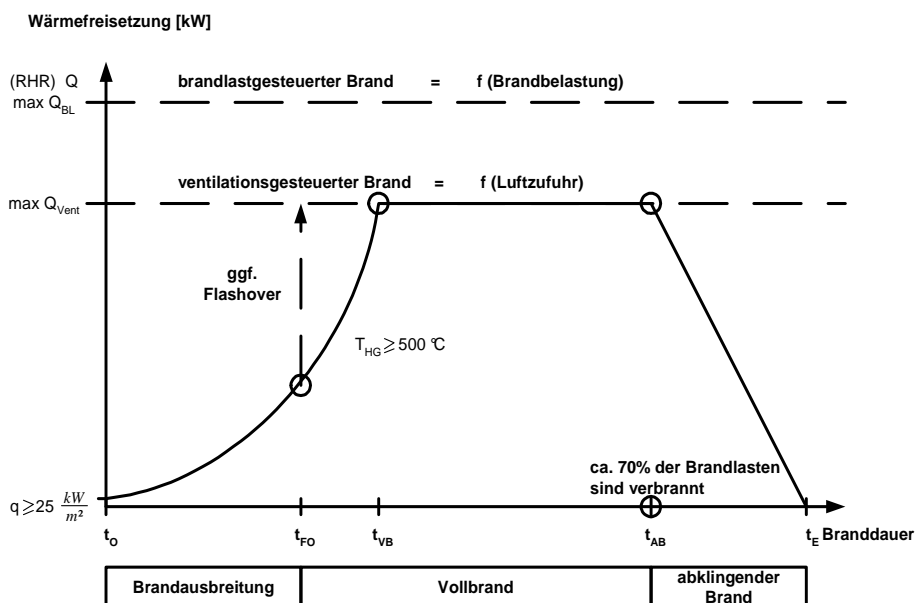


Bild 4.3 Schema für einen natürlichen Brandverlauf mit den Brandphasen¹: Brandausbreitung, Vollbrand und abklingender Brand

¹ „Natural Fire Safety Concept“: Technical Report No 7, ARBED Recherches, 1998.

Für Brandsimulationen wird der Brandverlauf in der Regel wie in Bild 4.3 dargestellt schematisiert den Berechnungen zu Grunde gelegt.

4.1.1 Definition des Bemessungsbrandes

Der Bemessungsbrand (engl. Design Fire) ist die quantitative Beschreibung des möglichen, zeitlichen Brandverlaufs in Form von zeitabhängigen, spezifischen Parametern (z. B. Wärmefreisetzungsrates, Flammenhöhe, Rauchentwicklungsrate usw.).

Es ist in der Regel ein theoretischer – aber durchaus möglicher – Brandverlauf, der eine Vielzahl denkbarer 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 (s. Bild 4.8, Brandverläufe mit Holzkrippen im Vergleich zur ETK).

In den meisten Fällen handelt es sich um eine brandlastgesteuerte Verbrennung mit unbeschränkter Luftzufuhr, wobei die Wärmefreisetzungsrates von Menge, Wesen, räumlicher Aufteilung der brennbaren Stoffe / Gegenstände abhängt.

4.2 Bemessungsbrände für die Schmelbrandphase

4.2.1 Brandszenario und Brandschutzaspekte

Die Beurteilung von Schmelbränden, bei denen die Wärmefreisetzung sehr gering ist, erfolgt im Rahmen von Brandschutzkonzepten und für die Auslegung von Brandschutzmaßnahmen i. A. nicht mit Hilfe von Brandsimulationen.

Die Brandgefahren, die mit „echten“ Schmelbränden verbunden sind, sind in der Regel auf die betroffenen Gegenstände oder auf den betroffenen Raum der Brandentstehung begrenzt.

Für Personen sind Brandszenarien – in der Regel auch für Personen in kleinen Aufenthaltsräumen – unkritisch. Ihre eigentlichen Gefahren liegen in der Möglichkeit, dass sie sich auch nach teilweise sehr langen Schmelddauern von mehreren Stunden gegebenenfalls zu offenen Flammenbränden entwickeln können.

Die realitätsnahe Beurteilung von Schmelbränden ist besonders im Hinblick auf die Entwicklung und Anordnung von Rauchmeldern im Brandraum von Bedeutung, um eine möglichst frühzeitige und zuverlässige Brandentdeckung zu gewährleisten.

4.2.2 Normative Bemessungsbrände

Für die Auslegung von bestimmten Brandschutzanlagen, die bereits in der frühen Brandphase wirken sollen – wie Brandmeldeanlagen – existieren normativ festgelegte Bemessungsbrände im Rahmen der Prüfvorschriften für die Anlagenkomponenten (z. B. EN 54-9 „Bestandteile automatischer Brandmeldeanlagen – Erprobungstests“).

4.3 Bemessungsbrände für Kleinbrände und für einzelne brennende Gegenstände

4.3.1 Brandszenario und Brandschutzaspekte

Teilweise werden auch kleinere Brände (mit spezifischen Wärmefreisetzung bis etwa zu 20 kW/m^2) 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 kommen etwa den Bränden einzelner Gegenstände nahe.

Das Brandverhalten von zu beurteilenden Gegenständen kann im Allgemeinen nicht theoretisch abgeleitet werden. Es muss bei Bedarf experimentell beurteilt werden.

4.3.2 Normative Bemessungsbrände

Normprüfungen, die brennende Einzelgegenstände abbilden, verwenden in der Regel zeitlich konstante Brandbeanspruchungen als Einwirkungen auf die Prüfgegenstände. Nachfolgend werden zwei beispielhaft näher betrachtet.

4.3.2.1 SBI-Test nach prEN 13823

Einzelne brennende Gegenstände können dazu führen, dass sich benachbart angeordnete brennbare Bauteile oder brennbare Gegenstände ebenfalls entzünden und zu einer weiteren Brandausbreitung beitragen. Ferner können sie durch die Freisetzung teils beachtlicher Rauchmengen – insbesondere wenn sie im Bereich von Rettungswegen angeordnet sind – unakzeptable Brandgefahren im Sinne der Personensicherheit darstellen.

Für die Beurteilung von Bauprodukten ist mit der prEN 13823 (SBI – Single Burning Item) ein Prüfverfahren festgelegt, im dem die Auswirkung eines einzelnen brennenden Gegenstandes – in der Größe eines brennenden Papierkorbes – auf das Brandverhalten angrenzender Bauprodukte bewertet wird. Der Bemessungsbrand für dieses Testverfahren kann gemäß Tabelle 4.1 konkretisiert werden:

Tabelle 4.1 Bemessungsbrand des SBI-Testverfahrens nach prEN 13823

Kriterium	Größe	Einheit
Brandfläche und Brandort: Dreieckfläche in der Raumecke	Seitenlänge = 250	mm
Brandgut	Propangas	ohne
Wärmefreisetzung	30	kW
Dauer der Wärmefreisetzung	21	Minuten
Beurteilungsdauer	20	Minuten

4.3.2.2 Der Brandschacht-Test nach DIN 4102-1

Mit dem Brandschacht-Test nach DIN 4102-1 wird das Brandverhalten von Baustoffen geprüft und festgestellt, wie leicht sich brennbare Baustoffe an einem Brandgeschehen beteiligen. Als Ergebnis wird die Brennbarkeit als „schwerentflammbar“ oder „normalentflammbar“ klassifiziert.

Die Brandeinwirkung auf die Kanten senkrecht angeordneter Baustoffproben durch Gasflammen beträgt etwa 21 kW für die Dauer von 10 Minuten. Sie entspricht in etwa einem brennenden Gegenstand wie einem Papierkorb.

4.3.3 Festlegung von objektspezifischen Bemessungsbränden für spezielle 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.

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 (addiert) werden, dass sie für die Brandphase der „Brandausbreitung“ einen möglichen Verlauf des sich fortentwickelnden Brandgeschehens in einem Raum wiedergeben.

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

4.4 Bemessungsbrände für die Brandausbreitungsphase

4.4.1 Brandszenario und Brandschutzaspekte

Durch eine heftige Wärmefreisetzung auf der aktuellen Brandfläche werden in der Brandausbreitungsphase auch zunehmend benachbarte brennbare Gegenstände in das Brandgeschehen eingebunden, so dass das Feuer sich ständig ausbreitet und stärker wird. Das Brandgeschehen breitet sich bezogen auf die Grundfläche nach mehreren (oder in alle) Richtungen aus.

Die Entwicklung und -ausbreitung von Feuer und Rauch (des Brandes) hängt im Wesentlichen von folgenden Parametern ab:

- Art und Lagerungsdichte der brennbaren Stoffe
- Menge der brennbaren Stoffe
- verfügbarer Luftsauerstoff für eine vollständige Verbrennung
- Lage des Brandortes im Brandraum (Mitte, Rand, Ecke).

Vorgenannte Parameter des Brandgeschehens sind mit dem konkreten Brandszenarium festzulegen.

Diese Brandausbreitungsphase kann durch folgende Gründe beendet werden oder sich in ihrem Charakter stark verändern:

- Durch räumlichen Abstand zu anderen brennbaren Gegenständen oder durch Bauteile wird eine weitere Ausbreitung des Brandes begrenzt.
- Durch wirksame Löschmaßnahmen (Feuerwehr oder Löschanlagen) wird eine weitere Brandausbreitung behindert und in der Regel reduziert.
- Nach Erreichen von Flash-over-Bedingungen erfolgt eine starke Beschleunigung der Brandausbreitung auf den ganzen Brandraum und das Brandszenarium wandelt sich plötzlich in ein Vollbrandszenarium.
- Die Brandausbreitung hat den ganzen Raum erfasst und alle brennbaren Stoffe sind in das Brandgeschehen eingebunden, so dass eine Zunahme des Brandes nicht mehr möglich ist.

4.4.1.1 Bedeutung der Brandausbreitungsphase für die Brandsicherheit

Während dieser Brandausbreitungsphase findet zunächst noch die Selbstrettung der Gebäudenutzer über die vorgesehenen Rettungswege statt. Später – bei verrauchten baulichen Rettungswegen – ist die Fremdrettung durch die Hilfskräfte unter Verwendung von geeigneten Rettungsgeräten sicherzustellen.

Die Brandrisiken entstehen vorwiegend durch die Rauchbildung und Rauchausbreitung innerhalb des Brandraumes und in den Räumen, die mit dem Brandraum in offener Verbindung stehen (z. B. nicht geschlossene Türen zum Brandraum).

4.4.1.2 Flash-over

Als Flash-over-Bedingung wird üblicherweise das Erreichen einer Temperatur in der Heißgasschicht von etwa 500 °C bis 600 °C verwendet. Daraus ergibt sich (bei anzunehmender nahezu stationärer Wärmeabsorption) als Grenzwert für die Wärmefreisetzung vor Eintritt eines Flash-over bei einer Flash-over-Temperatur von 500 °C [4.44]:

$$Q_{FO} = 610 \cdot \left(\alpha_{inst} \cdot A_T \cdot A_W \cdot h_{Fenster}^{0,5} \right)^{0,5} \quad (4.1)$$

mit

Q_{F0}	Wärmefreisetzungsrate, bei der ein Flash-over eintritt [kW]
α_{inst}	instationäre Wärmeübergangszahl [kW/m ² K]
A_T	innere Oberfläche des Brandraumes [m ²]
A_W	Fensterfläche [m ²]
$h_{Fenster}$	Höhe der Öffnungen [m]

4.4.1.3 Begrenzung der Wärmefreisetzung durch fehlende Verbrennungsluft

Insbesondere bei kleineren Räumen mit geringen Zuluffflächen kann für eine vollständige Verbrennung der entflammten Stoffe die nötige Verbrennungsluft fehlen und so die Brandgröße (Wärmefreisetzung) begrenzen.

Als Anhaltswert für Räume bis zu etwa 50 m² Grundfläche kann für die maximale Wärmefreisetzung folgende Beziehung herangezogen werden:

$$\max Q_{Vent} = 5,5 \cdot \left(\frac{H_u}{60} \right) \cdot A_{Fenster} \cdot h_{Fenster}^{0,5} \quad (4.2)$$

oder

$$\max Q_{Vent} = 330 \cdot H_u \cdot A_{Fenster} \cdot h_{Fenster}^{0,5} \quad (4.3)$$

mit

$\max Q_{Vent}$	Wärmefreisetzungsrate, bei der ein Flash-over eintritt [kW]
$A_{Fenster}$	Fläche der Fenster als Zuluftöffnung [m ²]
$h_{Fenster}$	Höhe der Fenster als Zuluftöffnungen [m]
H_u	unterer Heizwert der brennbaren Stoffe [kJ/kg] bzw. [kWh/kg] (1 kWh= 3.600 kJ)

4.4.2 Normative Bemessungsbrände

Normativ festgelegte Bemessungsbrände werden benötigt, um insbesondere Maßnahmen des anlagentechnischen Brandschutzes zu dimensionieren. Die anlagentechnischen Maßnahmen müssen ihre Wirkung in der Phase der Brandentwicklung und Brandausbreitung entfalten, also bevor die Vollbrandphase eingetreten ist.

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.

4.4.2.1 Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung bei geringer Bestimmtheit der Brandbedingungen mit normativen Ansätzen

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 4.4 und Tabelle 4.2):

- Es werden verschiedene Brandausbreitungsgeschwindigkeiten bzw. Brandentwicklungen klassifiziert; z. B.: langsam, mittel, schnell und sehr schnell.
- Die charakteristischen Brandentwicklungsgeschwindigkeiten 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 Amerika festgelegt.
- Die Brandentwicklung wird mit einem sogenannten t^2 -Ansatz beschrieben:

$$Q[\text{kW}] = \alpha \cdot t_{\text{Brand}}^2 \quad (4.4)$$

$$Q[\text{MW}] = \left(\frac{t_{\text{Brand}}}{t_g} \right)^2 \quad (4.5)$$

mit

Q	Wärmefreisetzungsrate [kW bzw. MW]
α	Parameter des Zunahme-Mechanismus der Wärmefreisetzungsrates [kW/s ²]
t_{Brand}	Branddauer ohne Berücksichtigung der Inkubationsphase / 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/m²] auf die ganze Brandfläche bezogen. Die Brände dieser Kategorie sind in etwa kreisförmig; der Kreisradius wächst linear mit der Zeit. Voraussetzung für die Anwendung der nachfolgenden Tabellen ist eine unbeschränkte Luftzufuhr; Strahlungseffekte sind nicht berücksichtigt. Der Parameter α kennzeichnet den Anstieg der Wärmefreisetzung.

Aus den Versuchen im Originalmaßstab zur Einstufung von Nutzungseinheiten in Brandentwicklungsklassen ergaben sich Maximalwerte für die Abbrandleistung vor einem unterschied-

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

lichen Abklingen des Brandes. Die Formel gibt den Brandverlauf also nur bis zum Erreichen dieses Maximalwertes in brauchbarer Annäherung wieder.

Der Anhang zu diesem Kapitel 4 enthält Empfehlungen für die Einstufung verschiedener Nutzungen und Werte für bestimmte brennbare Materialien.

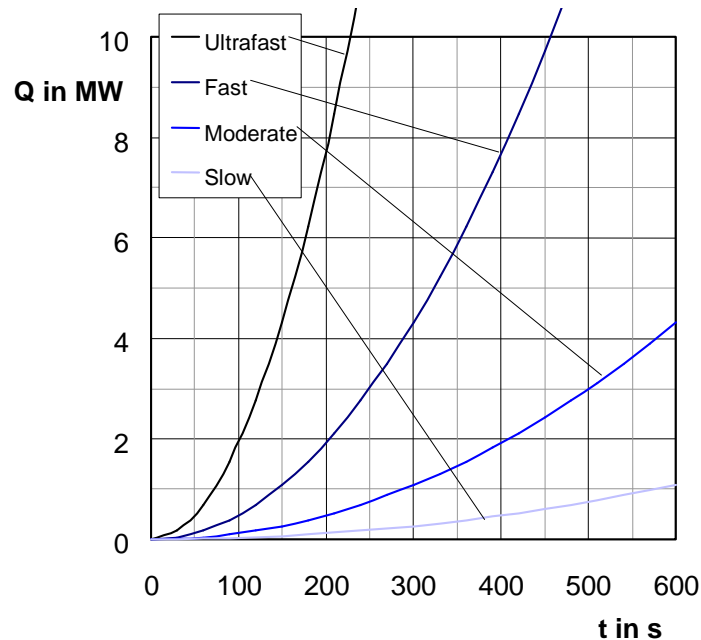


Bild 4.4 Brandentwicklung bis zum Erreichen einer maximalen Wärmefreisetzung

Tabelle 4.2 Standardwerte für α und t_g (nach NFPA 92 B)

Geschwindigkeit der Brandentwicklung	Parameter α [kW/s ²]	t_g [s] Branddauer bis zum Erreichen von $Q = 1$ MW
langsam	0,002931	600
mittel	0,011720	300
schnell	0,046890	150
sehr schnell	0,187600	75

Tabelle 4.3 Empfehlungen für die Festlegung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Brandausbreitung	Angaben nach Schneider / Lebeda	
	mm/s	cm/min
Brandentstehungsphase	1 bis 2	6 bis 12
langsam	5	30
mittel	8	48
schnell	12 bis 20	72 bis 120

sehr schnell	30 bis 50	180 bis 300
Flash-over	80 bis 120	480 bis 720
DIN 18232: langsam	2,5	15
DIN 18232: mittel	4,0	24
DIN 18232: schnell	7,5	45
DIN 18230: „Vollbrand“	16,7	100

4.4.3 Objektspezifische Beschreibung der zeitlichen Brandentwicklung

4.4.3.1 Brandszenario und Brandschutzaspekte

Da das Brandgeschehen immer von einer Reihe von Einflüssen, 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 zu Kapitel 4 in Tabelle A4.6 zusammengestellt.

4.4.3.2 Bemessungsbrände aufgrund von objektspezifischen Brandversuchen

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

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

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

Einzelne Versuchsergebnisse sind im Anhang zu Kapitel 4 in Tabelle A4.7 wiedergegeben.

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

4.4.3.3 Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung mit hoher Bestimmtheit der Brandbedingungen bei gleichmäßiger, radialer Brandausbreitung

Wenn die gegebenen Informationen und Brandszenarien eine Festlegung,

- der horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit und
- der Abbrandgeschwindigkeit der brennbaren Stoffe

zulassen, kann die Wärmefreisetzung als Funktion der Branddauer direkt angegeben werden:

$$Q(t_{\text{Brand}}) = A_{\text{Brand}}(t_{\text{Brand}}) \cdot H_{\text{hu}} \cdot v_{\text{ab}} \cdot k_{\text{Verb}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \quad (4.6)$$

mit

$$A_{\text{Brand}} = 3,14 \cdot v_{\text{aus}}^2 \cdot t_{\text{Brand}}^2 \quad \text{für kreisförmige Brandflächen} \quad (4.7)$$

$$A_{\text{Brand}} = 3,14 \cdot v_{\text{aus}}^2 \cdot t_{\text{Brand}}^2 \cdot \frac{\text{Winkel}_{\text{Ausbreitung}}}{360^\circ} \quad \text{für kissektorförmige Brandflächen} \quad (4.8)$$

und

t_{Brand} Branddauer [min]

A_{Brand} Brandfläche nach der Branddauer t_{Brand} [m²]

v_{aus} Brandausbreitungsgeschwindigkeit in horizontaler Richtung nach allen Seiten gleich schnell [m/min] (typische Werte: 0,25 bis 0,50 m/min)

v_{ab} mittlere spezifische Abbrandgeschwindigkeit des Stoffes oder der Mischung aus verschiedenen Stoffen (1) [kg/min] (typische Werte: 0,50 bis 0,75 kg/min)

H_{hu} mittlerer unterer Heizwert des Stoffes oder der Mischung aus verschiedenen Stoffen (1) [kWh/kg] (typische Werte siehe DIN 18230-3)

Q aktuelle Wärmefreisetzung auf der Brandfläche A_{Brand} zum Zeitpunkt t_{Brand} [kW]

k_{Verb} Faktor zur Beschreibung der Verbrennungseffektivität [-] ($\leq 1,0$, typisch: 0,8)

(1) Mittelwertbildung über die Massenanteile

4.4.3.4 Hinweise zur Bewertung von linearen Brandausbreitungen

Beispiele für maximale spezifische Wärmefreisetzungsraten bei linearer Brandausbreitung entlang linienförmig vorliegender Brandlasten sind im Anhang zu Kapitel 4 in Tabelle A4.7 zusammengestellt.

4.4.4 Bemessungsbrände für Brände nach dem Wirksamwerden von Löschmaßnahmen

4.4.4.1 Einfluss von Löschmaßnahmen auf die Entwicklung eines Bemessungsbrandes

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 unterdrückt wird. Je nach dem Auslösezeitpunkt und nach der abschätzbaren Effektivität der Löschmaßnahme können sich unterschiedliche Brandentwicklungen ereignen.

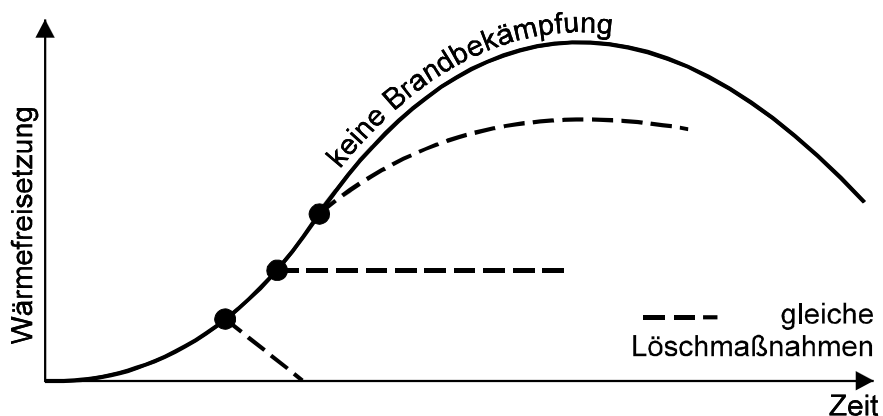


Bild 4.5 Modellcharakteristiken für den Einfluss von Löschmaßnahmen auf die Entwicklung eines Bemessungsbrandes

Schema: Brandunterdrückung

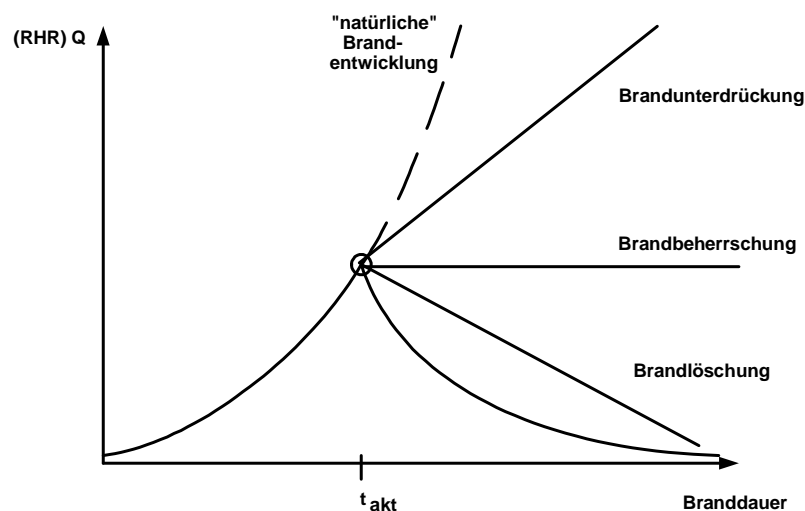


Bild 4.6 Modellcharakteristiken für den Einfluss von Löschmaßnahmen auf die Entwicklung eines Bemessungsbrandes

4.4.4.2 Bemessungsbrände bei Wirksamwerden von Löschmaßnahmen der Feuerwehr

Normativ festgelegte Bemessungsbrände sind in DIN 18232 für die Auslegung von Rauchabzugsanlagen beschrieben. Sie dienen der Erzielung von raucharmen Schichten innerhalb des Raumes der Brandentstehung für die Dauer der Brandbekämpfung bei kontrolliertem, beherrschtem Ereignis.

Das zu Grunde liegende Brandszenarium beschreibt einen Brand, der nach Ablauf einer bestimmten „Vorbrennzeit“ je nach Bemessungsgruppe in seiner weiteren Entwicklung durch den Löschangriff der Feuerwehr gestoppt und auf der dann erreichten Größe konstant gehalten wird. Das weitere Brandgeschehen ist ein gleichbleibendes Feuer ohne Berücksichtigung von Löscheffekten oder des Ausbrennens der Brandlasten. Diese Brandphase mit konstanter Brandleistung wird als Bemessungsbrand verwendet und die eigentliche Brandausbreitungsphase selbst bleibt unberücksichtigt.

Die genaue Art und Lagerung von brennbaren Stoffen werden in der Bemessungsgruppe berücksichtigt und fließt in die Festlegung der Brandleistung ein (siehe Anhang zu Kapitel 4, Tabelle A4.8).

4.4.4.3 Bemessungsbrände bei Wirksamwerden von automatischen Feuerlöschanlagen

Feuerlöschanlagen werden für sich ausbreitende Brände ausgelegt. Die der Auslegung der Löschanlagen zu Grunde zu legende Brandgefahr ergibt sich in Abhängigkeit von der

- Art des Brennstoffes (der Brandlast)
- den Lagerungsbedingungen der Brandlasten und
- den Raumbedingungen (Höhe).

Da hier gleichzeitig das Brandverhalten der Stoffe und ihre Löschbarkeit wesentlich sind, kann das Zusammenwirken der Brandentwicklung unter Einfluss der Löschwirkung der Anlage nur näherungsweise beschrieben werden. Die Auslegung der Anlagen selbst erfolgt praktisch unter Verwendung von experimentellen Untersuchungen und aufgrund von Schadenserfahrungen mit bestimmten Gefahrenszenarien.

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 [4.12], [4.24]:

$$Q(t) = Q(t_{\text{act}}) \cdot \exp\left[\frac{-(t - t_{\text{act}})}{3,0 \cdot w^{-1,85}}\right] \quad (\text{Formel gilt nur für } t \geq t_{\text{act}}) \quad (4.9)$$

mit

$Q(t)$ Wärmefreisetzungsrate [kW]

t Zeit seit Brandbeginn [s]

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

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

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

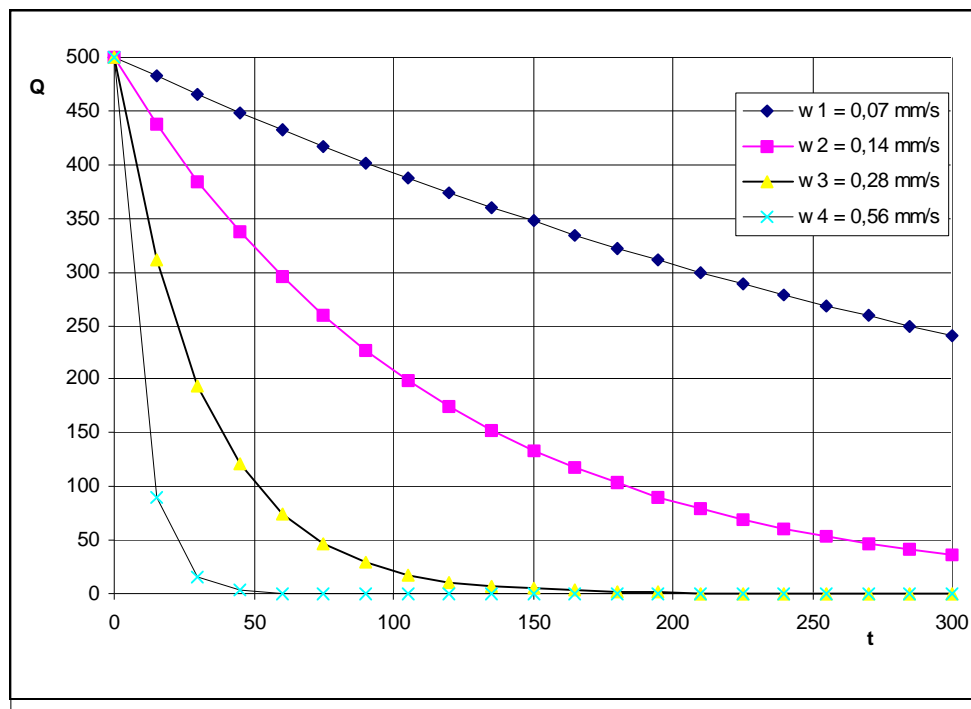


Bild 4.7 Einfluss der Sprinklerwirkung = f (Wasserbeaufschlagung)

Wegen der Ungewissheit der Einsatzgrenzen dieses Algorithmus sollte, nach Fleming [4.8], sein Einsatz auf „leichte Risiken“ [4.25] mit langsamer bis mittlerer Brandausbreitungsgeschwindigkeit 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.

4.5 Bemessungsbrände für die Vollbrandphase

4.5.1 Brandszenario und Brandschutzaspekte

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.

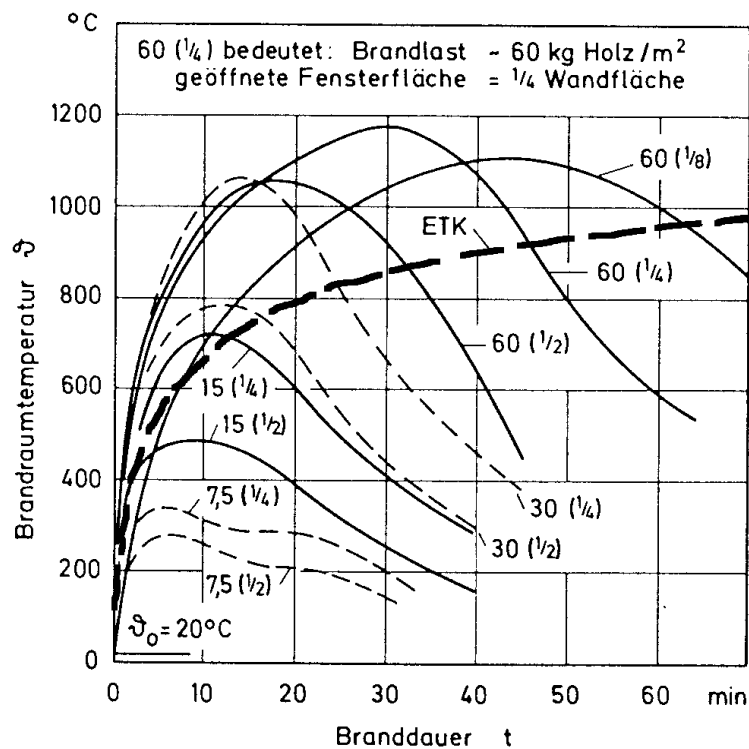
Es lassen sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Brandszenarien unterscheiden:

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

4.5.2 Normativ festgelegte Bemessungsbrände ohne Betrachtung der Brandparameter

Das „Standardfeuer“ zur Beschreibung von Vollbränden ist die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK), die als normative Vorgabe zur Steuerung der Prüföfen für die Normprüfungen von Bauteilen in der DIN 4102-2 in Übereinstimmung mit international verwendeten Prüfverfahren festgelegt ist.

Die ETK wird als Temperaturentwicklung im Brandraum beschrieben und ist im Vergleich zu verschiedenen natürlichen Brandentwicklungen mit unterschiedlichen Brandbelastungen und Ventilationsverhältnissen nachfolgend grafisch dargestellt.



Quelle: Kordina, Meyer-Ottens: Beton Brandschutz Handbuch

Bild 4.8 Temperatur-Zeit-Verläufe bei Holzkippenbränden in Laborversuchen² im Vergleich zur Einheitstemperaturzeitkurve (ETK)³

Hier wird besonders deutlich, dass die ETK nicht alle real vorkommenden Brandraumtemperaturen auf der sicheren Seite einhüllt und somit auch unter verschiedenen Bedingungen die Brandszenarien nicht „auf der sicheren Seite“ vollständig abdeckt.

² BUTHER, E. G.; CHITTY, T. B.; ASHTON, K. A.: The temperature attained by steel in building fires. Fire Research Technical Paper No 15, Her Majesty's Stationery Office, London, 1966.

³ Entnommen aus: KORDINA, K.; MEYER-OTTENS, C.: Beton Brandschutz Handbuch (1. Auflage), Beton-Verlag, Düsseldorf, 1981.

4.5.3 Normativ festgelegte Bemessungsbrände mit Berücksichtigung der Brandparameter

4.5.3.1 Bemessungsbrände nach DIN 18230-1

Eine Methode, die Brandentwicklung im Vollbrandstadium unter Berücksichtigung der anzunehmenden Brandlasten (in ihrer Art, Menge und Anordnung) sowie der im Brandfall zu erwartenden Ventilationsverhältnisse realitätsnah und normativ geregelt zu beschreiben, ist mit dem Verfahren der DIN 18230-1 gegeben.

Mit diesem Verfahren wird der Verlauf eines Naturbrandes rechnerisch so in einen Normbrand umgerechnet, dass im Bauteil die Brandwirkungen unter den beiden Brandverläufen gleich (äquivalent) sind.

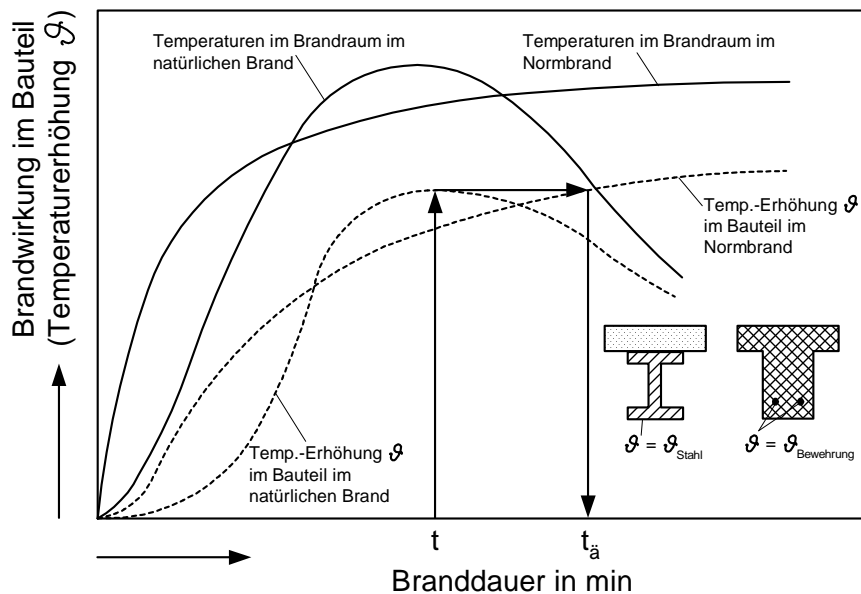


Bild 4.9 Umrechnung der Brandwirkung eines Naturbrandes auf die Normbrandwirkung nach DIN 4102 Teil 2⁴

4.5.3.2 Zeitunabhängige Brandverläufe für spezielle Nutzungseinheiten

Beispiele für zeitunabhängige Brandverläufe für spezielle Nutzungen (Steady-State Design-Fires) aus der Fachliteratur sind im Anhang zu Kapitel 4 in Tabellen 4.9 und 4.10 zusammengestellt.

⁴ SCHNEIDER, U.: Umrechnung von natürlichen Bränden auf die Brandbeanspruchung nach DIN 4102. Zentralblatt für Industriebau, 19. Jahrgang, Heft 1, S. 24 / 29, C.R. Vincentz Verlag, Hannover, 1973.

4.6 Abklingphase

Wenn die Brandlast im Gebäude verbraucht ist und / oder keine weitere Brandausbreitung auf benachbarte Räume oder Gebäude stattfindet, setzt die Abklingphase im Brandverlauf ein. In Ermangelung ausreichend abgesicherter Informationen wird davon ausgegangen, dass sich die Energiefreisetzungsrates verringert, wenn 80 % bis 90 % der anfänglich vorhandenen Brandlast umgesetzt ist. Der Rest der Brandlast kann z. B. mittels einer linear abfallenden Energiefreisetzungsrates verbrennen.

4.7 Literatur

- [4.1] *HANSELL, G.; MORGAN, H.*: Design approaches for smoke control in atrium buildings. Building Research Establishment Report CI / SfB 981 (K23), 1994, Borehamwood, Herts (GB).
- [4.2] *MORGAN, H.; GARDNER, J.*: Design principles for smoke ventilation in enclosed shopping centers. Building Research Establishment Report, CI / SfB 34 (K23), 1990, Borehamwood, Herts (GB).
- [4.3] *KLOTE, J. H.*: Method of Predicting Smoke Movements in Atria with Application to Smoke Management. NISTIR 5516, U.S. Department of Commerce, 1994, USA.
- [4.4] NFPA 92 B: Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas. NFPA, 1995, Quincy MA (USA).
- [4.5] *DEAL, S. E.*: Technical Reference Guide for FPEtool vers. 3.2. NISTIR 5486, U.S. Department of Commerce, 1994, USA.
- [4.6] *NELSON, H. E.*: FPEtool: Fire Protection Engineering Tools for Hazard Estimation. NISTIR 4380, U.S. Department of Commerce, 1991, USA.
- [4.7] 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).
- [4.8] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. SFPE / NFPA, 1995, NFPA, Quincy MA (USA).
EVANS, D.: Ceiling Jet Flows.
BABRAUSKAS, V.: Burning Rates.
FLEMING, R.: Automatic Sprinkler System Calculations.
PURSER, D. A.: Toxicity Assessment of Combustion Products.
- [4.9] *BEEVER, P.*: Cabins and Islands: A Fire Protection Strategy for an International Airport Terminal Building. Fire Safety Science – Proceedings of the Third International Symposium, Edinburgh, 1991, Elsevier Science, Barking (GB).
- [4.10] *BUKOWSKI, R. W.*: How to Evaluate Alternative Designs Based on Fire Modelling. NFPA Journal, March / April 1995, NFPA, Quincy MA (USA).
- [4.11] *WALTON, W.; BUDNICK, E.*: Quick Response Sprinkler in Office Configurations: Fire Test Results. NBSIR 88-3695, U.S. Department of Commerce, 1988, USA.

- [4.12] *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.
- [4.13] *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).
- [4.14] *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).
- [4.15] *MANGS, J.; KESKI-RAHKONEN, O.*: Characterization of the Fire Behaviour of a Burning Passenger Car. Parts I and II. Fire Safety Journal Vol. 23 No. 1, 1994, Elsevier Science, Oxford (GB).
- [4.16] *SHIPP, M.; SPEARPOINT, M.*: Measurements of the Severity of Fires Involving Private Motor Vehicles. Fire and Materials Vol. 19 No. 3, May / June 1995, J. Wiley & Sons, Chichester (GB).
- [4.17] *WALTON, W. D.*: Quick Response Sprinklers in Chemical Laboratories: Fire Test Results. NISTIR 89-4200, U.S. Department of Commerce, 1989, USA.
- [4.18] NFPA 101: A Guide on Alternative Approaches to Life Safety. NFPA, 1995, Quincy, MA (USA).
- [4.19] CBUF: Fire safety of upholstered furniture – the final report on the CBUF research programme, Ed. B. Sundstöm, 1995, Interscience Communications, London (GB).
- [4.20] *HÄGGLUND, B.; WICKSTRÖM, U.*: Smoke Control in Hospitals – A Numerical Study. Fire Safety Journal Vol. 16 No. 1, 1990, Elsevier Science, Barking, Essex (GB).
- [4.21] *RÖNN, H.; HILDENBRAND, CH.*: Brandrisiko von Getränkelagern. vfdb-Zeitschrift Forschung und Technik, 1 / 94, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart (D).
- [4.22] *BREIN, D.*: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. Teil 1: Literaturlauswertung. Forschungsbericht Nr. 55, 1985, Universität Karlsruhe (TH).
- [4.23] *STAHL, K.-H.*: VdS-Brandversuche mit Kunststoff-Lagerbehältern. vfdb-Zeitschrift Forschung und Technik, 1 / 94, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart (D).
- [4.24] *EVANS, D.*: Sprinkler Fire Suppression Algorithm for Hazard. NISTIR 5254, 1993, U.S. Department of Commerce, Technology Administration, USA.
- [4.25] NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems. NFPA, 1994, Quincy MA (USA).
- [4.26] *CORNELISSEN, A. ET AL.*: Risk-Cost Assessment for Non-Residential Buildings. Proceedings of the Sixth International Fire Conference. Interflam '93, Inter-Science Communications Ltd., 1993, London (GB).
- [4.27] *YUNG, D. ET AL.*: Comparative Risk Assessments of 3-Storey Wood-Frame and Masonry Construction Apartment Buildings. Proceedings of the Sixth International Fire Conference. Interflam '93, Inter-Science Communications Ltd., 1993, London (GB).

- [4.28] NFPA 204 M: Guide for Smoke and Heat Venting. NFPA, 1991, Quincy, MA (USA).
- [4.29] NFPA 204 M – A 97 ROP: Guide for Smoke and Heat Venting. NFPA, 1997, Quincy, MA (USA).
- [4.30] *TAKEDA, H.; YUNG, D.*: Simplified Fire Growth Models for Risk-Cost Assessment in Apartment Buildings. Selected Readings in Performance-Based Fire Safety Engineering, Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 1995, Boston (USA).
- [4.31] *MOORE, I. P. ET AL.*: Application of Quantitative Risk Based Design Using the Australian Approach Interim Fire Engineering Guidelines. Seminar Fire Safety Conference on Performance Based Concepts, Zurich, 1996 (CH).
- [4.32] Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (BauO NW).
- [4.33] *HOSSER, D.; DOBBERNACK, R.*: Rauchfreihaltung von Rettungswegen. Braunschweiger Brandschutz Tage 1995.
- [4.34] *EHM*: Kostenreduzierung im Hochbau und steigende Anforderungen im Umweltschutz – Ein Widerspruch?. VdS-Fachtagung Baulicher Brandschutz, 1995.
- [4.35] VdS 191: Unverbindliche Netto-Prämienrichtlinien für die Industrie-Feuer- und Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherung, 1989.
- [4.36] *BAMERT, E.*: Kriterien zur Festlegung brandschutztechnischer Anforderungen aus der Sicht der Versicherer. VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz, 1995.
- [4.37] *SCHNEIDER, U.*: Festlegung von Brandszenarien für den Entwurf von Gebäuden und für die Risikobetrachtung. VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (2), 1995.
- [4.38] ISO / TC92 / SC4 / WG1 / TG3: ISO/WD 13388 Fire Safety Engineering – Characterization of Buildings, their Occupants and Appropriate Design Fires with Respect to their Influence on Fire Safety, June 1995.
- [4.39] *WIESE, J.*: Ingenieurmethoden zum Nachweis ausreichender Brandsicherheit, Brandschutzatlas, Wehner Verlag, 1996.
- [4.40] *MEACHAM, B. J.; CUSTER, R. L. P.*: Performance-Based Fire Safety Engineering: An Introduction Of Basic Concepts. Journal of Fire Protection Engineering 7(2), 1995, pp 35 - 54.
- [4.41] *MAGNUSSON, S. E.*: Performance-based codes. Sixth international fire conference – Interflam '93: Fire Safety Science, Engineering, Management – Proceedings. ISBN 0 9516320 3 5
- [4.42] *WIESE, J.*: Schutzziele für die Festlegung brandsicherheitstechnischer Anforderungen. 23. Brandschutzseminar des VdS, 1996.
- [4.43] *NÜSSLER, D.*: Zur Diskussion gestellt: Geschwächter Löschzug, verstärkte Löschruppe oder „TruppSystem Aachen“?. Brandschutz 10 / 1996.
- [4.44] *SCHNEIDER, U.*: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz. 1. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 2002. ISBN 3-8041-4189-7

- [4.45] *MOCK, R.; KRÖGER, W.*: Risiko und Sicherheit. Vorlesungen an der ETH-Zürich. Laboratorium für Sicherheitsanalytik, 2002, (www.lsa.ethz.ch/lisa/curricula/vorlesungen/rs/Abbildungen/rm_risikobegriff_RS02.pdf).
- [4.46] *KLOSE, A.*: Baurecht und Normung – Vorbeugender baulicher Brandschutz. Promat-Fachbeitrag, Bautechnischer Brandschutz '97.
- [4.47] DIN 4102-2
- [4.48] EN 03
- [4.49] Bauregelliste.
- [4.50] Beuth-Kommentare: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Kommentar zu DIN 18230. 2te Auflage, Beuth-Verlag, 1999.

ANHANG ZU KAPITEL 4

A4.1 BRANDLASTDICHTEN

Tabelle A4.1 Mittlere Brandlastdichten bei unterschiedlichen Nutzungen [CIB W 14]

Nutzung	Mittlere Brandlastdichte q (MJ/m ²)
Wohnung	780
Krankenhaus	230
Hotel (Bettenraum)	310
Büro	420
Laden	600
Industrielle Fertigung	300
Industrielle Fertigung und Lagerung (< 150 kg/m ²)	1.180
Bücherei	1.500
Schule	285

Tabelle A4.2 Beispiele für die Brandentwicklung und Wärmefreisetzung bei Möbeln

Aufbau des getesteten Möbels	Geschwindigkeit der Brandentwicklung	max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m ²]
Matratze aus flammhemmendem Material mit Ausnahme der ebenfalls getesteten normalen Bettwäsche	langsam	17,0
Federmatratze aus Baumwolle / Polyester mit Bettwäsche	mittel	567,5
Federmatratze aus Polyurethan mit Bettwäsche	schnell	908,0
Kleiderschrank aus dünnem (3,2 mm Dicke), lamellenverleimtem Holz (1,3 x 0,61 x 1,8 m Höhe)	sehr schnell	6.810,0
Kleiderschrank aus dünnem (3,2 mm Dicke), lamellenverleimtem Holz (1,3 x 0,61 x 1,8 m Höhe) mit flammhemmendem Anstrich	sehr schnell	3.860,0
Kleiderschrank aus Holzspanplatten (12,7 mm Dicke); (1,3 x 0,61 x 1,8 m Höhe)	sehr schnell	4.704,0
Kleiderschrank mit Schubladen aus Holzspanplatten (19,0 mm Dicke); (1,3 x 0,61 x 1,8 m Höhe)	schnell	2.554,0
schwere * Polstermöbel, Typ A **	schnell	5.107,0
Polstermöbel, Typ A **, mittleres * Gewicht	schnell	4.086,0
Polstermöbel, Typ A **, beschränktes * Gewicht	schnell	2.497,0
leichte * Polstermöbel, Typ A **	schnell	1.702,0
schwere * Polstermöbel, Typ B **	mittel	1.986,3
Polstermöbel, Typ B **, mittleres ** Gewicht	mittel	1.645,8
Polstermöbel, Typ B **, beschränktes * Gewicht	mittel	1.021,5
leichte * Polstermöbel, Typ B **	mittel	681,0
schwere * Polstermöbel, Typ C	langsam	795,0
Polstermöbel, Typ C **, mittleres * Gewicht	langsam	681,0
Polstermöbel, Typ C **, beschränktes * Gewicht	langsam	397,3
leichte * Polstermöbel, Typ C **	mittel	170,3
Ergebnisse der Brandversuche im Maßstab 1:1 [4.5], [4.6], [4.8] – Babrauskas, [4.18], [4.29]		

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

* Möbelgewichte	
schwere Möbel:	spezifische Last größer als $73,0 \text{ kg/m}^2$. Das Gewicht einer normalen Couch von 1,8 m Länge ist größer als 136,0 kg.
mittleres Gewicht:	spezifische Last liegt zwischen $49,0$ und $73,0 \text{ kg/m}^2$. Das Gewicht einer normalen Couch von 1,8 m Länge liegt zwischen 68,8 und 136,0 kg.
beschränktes Gewicht:	spezifische Last liegt zwischen $24,5$ und $49,0 \text{ kg/m}^2$. Das Gewicht einer normalen Couch von 1,8 m Länge liegt zwischen 34,0 und 68,0 kg.
leichte Möbel:	spezifische Last ist kleiner als $24,5 \text{ kg/m}^2$. Das Gewicht einer normalen Couch ist kleiner als 34,0 kg.

** Aufbau	
Typ A:	Möbel bestehend aus: normalem oder leicht flammhemmend behandeltem Schaum, bedeckt mit einer Nylonhülle oder mit einem Kunststoff, welcher unter Hitzeeinwirkung schmilzt.
Typ B:	Möbel bestehend aus: normalem oder leicht flammhemmend behandeltem Schaum, bedeckt entweder mit Nylonhülle oder mit Kunststoff, welcher unter Hitzeeinwirkung schmilzt. Gleichzeitiges Vorhandensein dieser zwei Hüllen ist ausgeschlossen.
Typ C:	Möbel bestehend aus: flammhemmend behandeltem Schaum, bedeckt mit einer Kunststoff- oder Baumwollhülle oder anderen Textilien, welche nicht unter Hitzeeinwirkung schmelzen.

Die Werte der Wärmefreisetzungsrate wurden für Möbel mit einfacher Form ermittelt (z. B. Sitzlehne, Armstützen, Sitzfläche – einfache, rechteckige / quadratische, nicht gerundete Formen). Für Möbel mit gerundeten Formen werden diese Werte um 50 % erhöht.

Tabelle A4.3 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 [4.11]	langsam	1,8
PC-Arbeitsplatz; massive Möbel (Holzspanplatten); Versuch in einem Raum mit ISO 9705-mäßigen Abmessungen [4.11]	langsam	2,5
PC-Arbeitsplatz in einem Großraumbüro; massive Möbel (Holzspanplatten) und mit brennbaren Wandschirmen unterteilt [4.12], [4.13]	schnell	6,8
Büro; Papier – Dokumentation auf Metallregalen; freie Verbrennung [4.11]	bis 200 s - mittel und nach 200 s - schnell	1,6
Büroeinheit; massive Möbel (Holzspanplatten); Versuch in einem Raum mit ISO 9705-mäßigen Abmessungen [4.11]	langsam	2,25
Verschiedene Büro-Gegenstände (Ausrüstung von Arbeitsplätzen); freie Verbrennung [4.12]	im Durchschnitt langsam	-
Mobile Metallregale mit Archivdokumenten [4.14]	schnell	-
Pkw in einem öffentlichen Parkhaus [4.15]	langsam	2,0
Pkw in einer kleinen, gut belüfteten Garage [4.16]	schnell	8,5
Chemielabor [4.17]	sehr schnell	2,0
Diverse Ausstellungen [4.4]	langsam	-
Normales Bett in einem schwedischen Spital [4.20]	langsam	0,3

Tabelle A4.4 Beispiele für Brandentwicklungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Nutzungen (nach den angegebenen Quellen)

Nutzung	Geschwindigkeit der Brandentwicklung
Wohnungen [4.7]	mittel
Büros [4.7]	mittel
Warenhaus – Verkauf [4.7], [4.9]	schnell
Hotel – Rezeption [4.7]	mittel
Hotel – Zimmer [4.7]	mittel
Gemäldegalerie [4.7]	langsam
jegliche Nutzung ohne leichtbrennbare Stoffe [4.10]	mittel

Tabelle A4.5 Angaben zur Brandentwicklung für ausgewählte Lagerungsarten (aus Versuchen im Maßstab 1:1 nach den angegebenen Quellen)

Waren	Lagerungsart	Lagerungshöhe [m]	Geschwindigkeit der Brandentwicklung	max. spezifische Wärme-freisetzungsrate [kW/m ²]
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.4]	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 %) [4.4]	gestapelt / Block-lagerung	1,5	schnell	3.746
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.4]	gestapelt / Block-lagerung	3,0	schnell	6.810
Holzpaletten (Abmessungen: 1,2 x 1,2 x 0,14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6,0 - 12,0 %) [4.4]	gestapelt / Block-lagerung	4,9	schnell	10.215
gefüllte Postsäcke [4.4]	gestapelt / Block-lagerung	1,5	schnell	397
unterteilte Leerkartons [4.4]	gestapelt / Block-lagerung	4,6	sehr schnell	2.270

Waren	Lagerungsart	Lagerungshöhe [m]	Geschwindigkeit der Brandentwicklung	max. spezifische Wärme-freisetzungsrate [kW/m ²]
Papierrollen [4.4]	senkrecht gestapelt	6,1	sehr schnell	-
Bekleidung aus Baumwolle, PE, PE / Baumwolle, Acryl / Nylon / PE [4.4]	Regale	3,7	sehr schnell	-
Leerkartons auf Holzpaletten [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,6 - 9,1	mittel - schnell	-
Papierartikel in Kartons [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	6,1	langsam - mittel	-
gefüllte Briefboxen auf Rollwagen [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	1,5	schnell	8.512,5
PE-Kehrichteimer in Kartons [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	2.837,5
GFK-Duschkabine in Kartons [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	1.298,5
PE-Flaschen in unterteilten Kartons [4.4]	Regale	4,6	sehr schnell	6.242,5
PE-Flaschen in unterteilten Kartons [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	1.929,5
PE-Paletten [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	0,9	schnell	-
PE-Paletten [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	1,8 - 2,4	sehr schnell	-
PU-Hartschaum Isolationsplatten [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	1.929,5
PS-Becher in unterteilten Kartons [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	13.620,0
PS-Zuber in Kartons [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,3	schnell	5.107,5
PS-Spielzeugteile in Kartons [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	schnell	2.043,0
PS-Hartschaum Isolationsplatten [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,3	sehr schnell	3.291,5
PVC-Flaschen in verteilten Kartons [4.4]	gestapelt / Blocklagerung	4,6	sehr schnell	3.405,0

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

Waren	Lagerungsart	Lagerungshöhe [m]	Geschwindigkeit der Brandentwicklung	max. spezifische Wärme-freisetzungsrate [kW/m ²]
PP-Kübel in unterteilten Kartons [4.4]	gestapelt / Block-lagerung	4,6	sehr schnell	4.426,5
PP oder PE Folienrollen [4.4]	gestapelt / Block-lagerung	4,3	sehr schnell	3.972,5
PE-Kisten mit leeren PET / Glasflaschen [4.21], [4.22]	gestapelt / Block-lagerung	?	schnell	-
PE-Kisten mit gefüllten (Bier / alkoholfreie Getränke) PET / Glasflaschen [4.21], [4.22]	gestapelt / Block-lagerung	?	langsam	-
Kleinladungsträger (KLT) aus - PE, - PP mit Graphit, - HDPE [4.23]	gestapelt / Block-lagerung	2,95	schnell - sehr schnell	-
Normal brennbare Gegenstände [4.28]	Regale	4,6 - 9,1	schnell - sehr schnell	-
PE: Polyethylen PU: Polyurethan PS: Polystyrol PP: Polypropylen PET: Polyethylenterephthalat HDPE: Polyethylen hoher Dichte GFK: Glasfaser verstärkte Polyester Hinweis: Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit wächst mit steigender der Lagerungshöhe.				

Tabelle A4.6 Qualität von Beschreibungen der Bemessungsbrände (exemplarisch)

Realitätsbezug	Verfügbare Informationen	Methode	Anwendungshinweise
sehr hoch	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - Stoffdaten der Brandlasten in der zu beurteilenden Lageranordnung - Anordnung der Brandlasten im Raum 	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung	im Rahmen von Parameterstudien verwendbar
mittel	<ul style="list-style-type: none"> - Annahmen zur Brandausbreitungsgeschwindigkeit für die Stoffgruppe 	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung	im Rahmen von Parameterstudien verwendbar, unter verschärfenden Rechenannahmen oder Sicherheitsbetrachtungen
gering	<ul style="list-style-type: none"> - 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

Tabelle A4.7 Maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m-Breite] bei „Linien-Brandlasten“

Stoff / Lagerungsart	max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m Breite]
Holz oder PMMA (senkrecht):	
Höhe: 0,61 m	104
1,83 m	243
2,44 m	622
3,66 m	1.038
PS fest (senkrecht):	
Höhe: 0,61m	218
1,83 m	450
2,44 m	1.384
3,66 m	2.352
PP fest (senkrecht):	
Höhe: 0,61 m	218
1,83 m	346
2,44 m	969
3,66 m	1.626
PMMA = Polymethylmethacrylat; PS = Polystyrol; PP = Polypropylen	

Tabelle A4.8 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
Brandleistung Wärmefreisetzung für natürliche RA: q = 300 kW/m ²	kW	1.500	3.000	6.000	12.000	24.000
Brandleistung Wärmefreisetzung für maschinelle RA: q = 600 kW/m ²	kW	3.000	6.000	12.000	24.000	48.000

Tabelle A4.9 Beispiele zeitunabhängiger Bemessungsbrände (Brandgröße und max. Wärmefreisetzungsrate) für verschiedene Nutzungen nach Literaturangaben

Nutzung [Quelle]	Brandfläche [m ²]	Brandumfang [m]	maximale Abbrandleistung [MW]
Einkaufszentrum: Brandherd unter Sprinklerkontrolle [4.2]	9,0	12,0	5,0
Warenannahme im Einkaufszentrum: Brand von einem Sattelschleppanhänger [4.2]	-	15,0	7,0
Parkhaus unterirdisch / gedeckt / geschlossen: Pkw-Brand [4.1], [4.2]	-	12,0	2,5
Büros mit Sprinkler [4.1]	16,0	14,0	1,0
Büros ohne Sprinkler [4.1]	47,0	24,0	6,0
Hotelzimmer von 20,0 m ² (Vollbrand des Inhaltes) [4.1]	-	-	1,0
Hotelzimmer mit Sprinkler (Feuer auf ein Bett begrenzt), [4.1]	-	6,0	0,5
Unterste Ebene eines Innenhofes (Mitte des Hofes): 4 Polstersessel [4.1]	-	6,0	2,0
Brand einer Latexschaum-Matratze: Wärmefreisetzungsrate gemessen an der Tür des Brandraumes [4.4]	-	-	1,27
Brand eines Wohnraumes: Wärmefreisetzungsrate gemessen an der Tür des Brandraumes nach dem Feuersprung [4.4]	-	-	4,2 - 8,4
Unterste Ebene eines Innenhofes (Mitte des Hofes) mit minimaler Brandlast, z. B. für Verpackungen, Christbäume und Möbel [4.3]	8,9	-	2,0
Unterste Ebene eines Innenhofes (Mitte des Hofes) mit planmäßig vorhandener Brandlast, z. B. für Holz, Möbeln und anderen brennbaren Stoffen / Waren / Gegenständen [4.3]	10,0	-	5,0
Großbrand im Innenhof für oben genannte Brandlast [4.3]	50,0	-	25,0

Tabelle A4.10 Beispiele zeitunabhängiger Bemessungsbrände (max. spezifische Wärmefreisetzungsrates) für verschiedene Nutzungen nach Literaturangaben

Nutzung / Lagerungsart der brennbaren Waren / Gegenstände	max. spezifische Wärmefreisetzungsrates [kW/m ²]
Büros mit Sprinkler [4.1]	115,0
Büros ohne Sprinkler [4.1]	185,0 [4.1]; 225,0 [4.3]; 227,0 [4.4]; 250,0 [4.7]; 290,0 [4.4]
Unterste Ebene eines Innenhofes (Mitte des Hofes) für unbekannte Nutzung [4.1]	500,0
Verkaufsfläche in einem Einkaufszentrum [4.3], [4.4], [4.7]	500,0
Wohnung [4.3], [4.4]	500,0
Hotelzimmer [4.4]	249,0
Industriegebäude [4.4]	260,0
Holz / PMMA (waagrecht) – obere Fläche des Stapels [4.4]	715,0
PS fest (waagrecht) – obere Fläche des Stapels [4.4]	1.362,0
PP fest (waagrecht) – obere Fläche des Stapels [4.4]	795,0
PMMA = Polymethylmethacrylat; PS = Polystyrol; PP = Polypropylen	

5 MODELLE FÜR DIE BRANDSIMULATION

5.1 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,
- Brandausbreitung,
- Wärmetransport durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung,
- Rauchgasmenge und Zusammensetzung,
- Entwicklung von Rauchgasschichten oder raucharmen Bereichen,
- 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 repräsentiert. 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 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.

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.

5 Modelle für die Brandsimulation

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 belegter 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 fundamentalen Gesetzen entwickelt wurden. Daraus ergibt sich eine unterschiedliche mathematische Struktur und demzufolge unterschiedliche Lösungsverfahren. Diese Unterschiede sind auch für die Anwendbarkeit auf bestimmte Fragestellungen und den Detaillierungsgrad der jeweiligen Modelle verantwortlich.

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.

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

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.

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 nicht unwesentlich, die physikalischen Grundlagen des jeweiligen Modells zu kennen, um eine Entscheidung bezüglich des 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 mög-

lichst naturgetreue Nachbau im Vordergrund. Allerdings besteht hier die Schwierigkeit darin, die vorkommenden Ähnlichkeitsgrößen zu erfüllen. Dazu sind u. U. andere Materialzusammenstellungen für die Umfassungen notwendig.

Wesentlichste Eingabe ist der Brandverlauf und die damit in Verbindung stehenden Stoffdaten. Eine Modellierung des Verbrennungsprozesses, welche auf fundamentalen Eigenschaften beruht, ist 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 Wärmefreisetzungsrage) zugeordnet wird. Dabei ist festzustellen, ob genügend Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung des Brandgutes zur Verfügung steht. Wenn genügend Sauerstoff vorhanden ist, findet im Wesentlichen eine stöchiometrische 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. Ein Feuer wird i. A. nicht erlöschen, solange genügend Brennstoff und Luftsauerstoff vorhanden ist und genügend Energie auf die Brennstoffoberfläche zurückgeführt wird, um weiteren gasförmigen Brennstoff zu erzeugen. Ist zudem bei ausreichendem Sauerstoffangebot noch unverbrauchter Brennstoff vorhanden, dann wächst das Feuer weiter an, bis es durch die Brandlastanordnung oder durch Eingriff von außen eine Begrenzung erfährt.

Mit dem Verbrennungsvorgang ist die Flammen- und Plumbildung verknüpft. Der Plume (Rauchgassäule) wird durch die aufsteigenden heißen Gase gebildet, deren Massenstrom sich durch eingemischte Umgebungsluft vergrößert. Diese Beimischung resultiert aus einer Impulsübertragung in Querrichtung, die am Rand dieser Strömung, in der so genannten Grenzschicht, Umgebungsluft mitführt und auf der Zähigkeit des Mediums (Gas) beruht. Durch die turbulente Strömung und Diffusion mischt sich in der Flamme die Umgebungsluft

mit den Brennstoffgasen. Dadurch wird die Verbrennung ermöglicht, welche wiederum die Wärmeenergie freisetzt. Ein großer Anteil dieser entstehenden Wärme wird von den Gasen innerhalb der Verbrennungszonen absorbiert und erhöht dadurch die Temperatur der Gase und der darin enthaltenen 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 solange in vertikaler Richtung auf, bis sie auf die Raumdecke auftreffen. An dieser Stelle können sie sich 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 Abbrandrate des brennenden Objekts, sondern kann auch weitere brennbare Objekte entzünden (Flash-over). Andererseits empfängt die Rauchgasschicht auch Wärmestrahlung aus der Flamme, genauso wie die Umfassungsbauteile. Die Temperatur der Rauchgase bestimmt sich aus dieser Energiebilanz.

Wie bereits beschrieben, wächst die Rauchgasschicht 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 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

5 Modelle für die Brandsimulation

- numerische Lösung der fundamentalen Gleichungen,
- Vereinfachungen der Gleichungen und
- physikalischen Modellierung im verkleinerten Maßstab unter Beachtung von Ähnlichkeitsgesetzen.

Vereinfachend ausgedrückt führt der erste Ansatz zu den Feldmodellen und der zweite Ansatz zu den Zonenmodellen. 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 rührt daher, dass sie durch Vereinfachungen aus den fundamentalen Gleichungen hervorgehen und unbestimmte Konstanten und Parameter experimentell festgelegt werden. Mit Hilfe dieser Ansätze kann beispielsweise der Plume-Massenstrom in einer bestimmten Höhe berechnet oder die Plume-Temperatur bestimmt werden. Die Zusammenfassung dieser einfachen Gleichungen ermöglicht oftmals ein ausreichendes Verständnis der Vorgänge, ohne ein komplexes Gleichungssystem lösen zu müssen. Beispiele dafür sind Handkalkulationen für die Entrauchung nach Yamana und Tanaka [5.1] oder der Entwurf der europäischen Norm prEN 12101 [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 Darstellung aber nicht Ziel dieses Kapitels ist. Die im Folgenden 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 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.

Bis zur Ausbildung einer definierten Rauchgasschicht steigt diese Rauchgassäule (Plume) 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, daher sind sie Gegenstand der nachstehenden Erläuterungen.

Modellierung der Flammen und des Rauchgasplumes

In der Literatur wurden vor allem punktförmige 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 vorausgesetzt, dass es sich um eine kleine Wärmequelle (engl. „weak plume“) handelt und ein relativ zum Branddurchmesser entfernter gelegener Bereich („far-field“) betrachtet wird. Für flächig verteilte Brandlasten konnten diese Ansätze erweitert werden, indem man das Konzept des virtuellen Ursprungs einführte, der im Wesentlichen zu einer Korrektur der Aufstiegshöhe in der entsprechenden Gleichung für die punktförmige Brandquelle führte.

Die Ausbildung von Feuer und Rauch oberhalb einer brennenden Oberfläche wird generell in drei Bereiche unterteilt:

- 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 5.1 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.

Zur Berechnung der entsprechenden Rauchgasmengen des Plumes (Rauchgassäule) kommen verschiedene Plume-Formeln 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]. Weitere Hinweise zur Anwendung der jeweiligen Gleichungen können weitergehender Literatur entnommen werden [5.10, 5.13, 5.14, 5.16].

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

$$\dot{m}_{PI} = 0,071 \cdot \dot{Q}_C^{1/3} \cdot z^{5/3} \quad (5.1)$$

5 Modelle für die Brandsimulation

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.

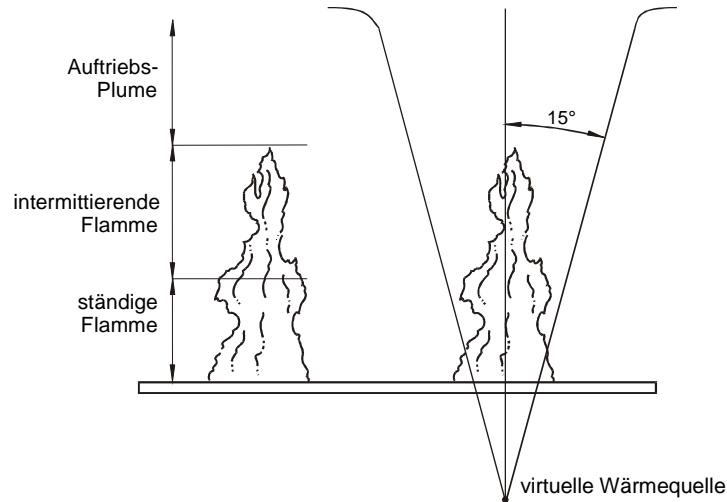


Bild 5.1 Schematische Darstellung der Ausbildung von Flamme und Plume nach [5.3]

Daneben existieren noch eine Vielzahl weiterer Plume-Formeln, z. B. von McCaffrey, Heskestad, Thomas und Hinkley. Die Schwierigkeiten bei der Beurteilung der einzelnen Modelle besteht darin, dass der aufwärts gerichtete Massenstrom praktisch nur indirekt gemessen werden kann und fast immer von anderen Einflussgrößen verfälscht wird.

Bild 5.2 weist zumindest grundsätzlich darauf hin, dass die Vorstellungen zur Unterteilung des Plumes, wie sie von McCaffrey vorgeschlagen wurden, richtig sind.

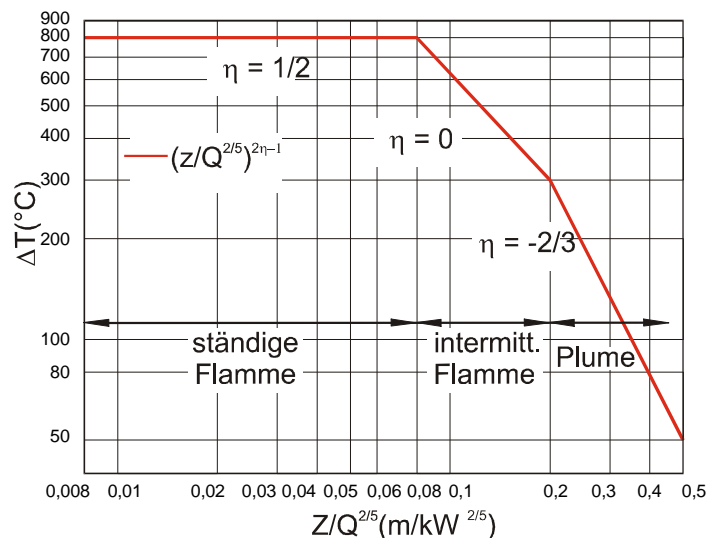


Bild 5.2 Temperaturerhöhung über der Zentralachse der Flamme und des Rauchgasplumes

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 (5.2) bis (5.5) verwenden [5.7 - 5.9].

$$v_{\text{jet,t}} = 0,95 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{z} \right)^{1/3} \quad \text{für } \frac{r}{z} \leq 0,15 \quad (5.2)$$

$$v_{\text{jet,t}} = 0,2 \cdot \frac{\dot{Q}^{1/3} \cdot z^{1/2}}{r^{5/6}} \quad \text{für } \frac{r}{z} > 0,15 \quad (5.3)$$

$$T_{\text{jet,t}} = T_{\infty} + \frac{16,9 \cdot \dot{Q}^{2/3}}{z^{5/3}} \quad \text{für } \frac{r}{z} \leq 0,18 \quad (5.4)$$

$$T_{\text{jet,t}} = T_{\infty} + \frac{5,38}{z} \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{r} \right)^{2/3} \quad \text{für } \frac{r}{z} > 0,18 \quad (5.5)$$

mit:

\dot{Q}	Energiefreisetzungsrate [kW]
r	Abstand des Sprinklers von der Plume-Achse [m]
$T_{\text{jet,t}}$	Temperatur im Ceiling Jet zum Zeitpunkt t [°C]
T_{∞}	Temperatur der Umgebungsluft [°C]
$T_{D,t}$	Sprinklertemperatur zum Zeitpunkt t [°C]
$v_{\text{jet,t}}$	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

5 Modelle für die Brandsimulation

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 Energiefreisetzungsrates einzusetzen. Diese Werte können auf der Grundlage bekannter Experimente oder theoretischer Verläufe festgelegt werden. Aus den obigen Gleichungen erhält man dann orts- und zeitabhängige Werte für Geschwindigkeit und Temperatur. Dabei ist jedoch wesentlich, dass sich eine definierte Rauchgasschicht noch nicht ausgebildet hat, da dies zu veränderten Temperaturprofilen führt. Dies tritt insbesondere bei kleinen Räumen sehr schnell ein und ist entsprechend zu berücksichtigen. Wesentlich ist auch die Lage des Brandherds, da in der Nähe einer Wand oder Ecke die Einmischung von Umgebungsluft reduziert ist und somit eine verminderte Abkühlung über der Höhe 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].

$$T_{D,t+\Delta t} = (T_{jet,t+\Delta t} - T_{D,t}) \cdot (1 - e^{-1/\tau}) + (T_{jet,t+\Delta t} - T_{jet,t}) \cdot \tau \cdot \left(e^{-1/\tau} + \frac{1}{\tau} - 1 \right) \quad (5.6)$$

$$\tau = \frac{RTI}{\sqrt{V_{jet,t}}} \quad (5.7)$$

mit

RTI Response Time Index, Maß für die Ansprechempfindlichkeit des Sprinklers [(ms)^{0,5}]

T_{jet,t+Δt} 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 (5.2) bis (5.5) 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 Holzrippen von insgesamt ca. 1.000 kg als Brandlast verwendet. Der Brand wurde unter Vorgabe der gemessenen Abbrandrate mit dem Brandsimulationsmodell HARVARD VI nachgerechnet. Bild 5.3 zeigt den Vergleich der berechneten Temperaturzeitkurve mit den gemessenen Temperaturen Höhe von 0,3 m über dem Boden und 0,3 m unter der Decke des Brandraumes, ca. 5 m entfernt vom Brandherd [5.12].

Die berechnete Rauchgastemperatur stimmt näherungsweise mit dem Mittelwert der Messwerte überein, der etwa in halber Raumhöhe anzutreffen ist. Unter der Decke liegen die gemessenen Temperaturen jedoch um bis zu 170 K höher. Die Bemessung von Bauteilen im Deckenbereich unter Ansatz der mit dem Zonenmodell berechneten mittleren Rauchgastemperatur läge demnach weit auf der unsicheren Seite. Ebenso bleiben Temperaturspitzen in der Nähe des Brandherdes, d. h. im Plumbereich, unberücksichtigt. Diese lokalen Temperaturmaxima sind durch Ansätze zur Berechnung von Plume-Temperaturen berechenbar, die auf der gleichen Grundlage beruhen wie die Plume- und Ceiling Jet-Modelle.

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 Energiefreisetzungsrate 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.

5 Modelle für die Brandsimulation

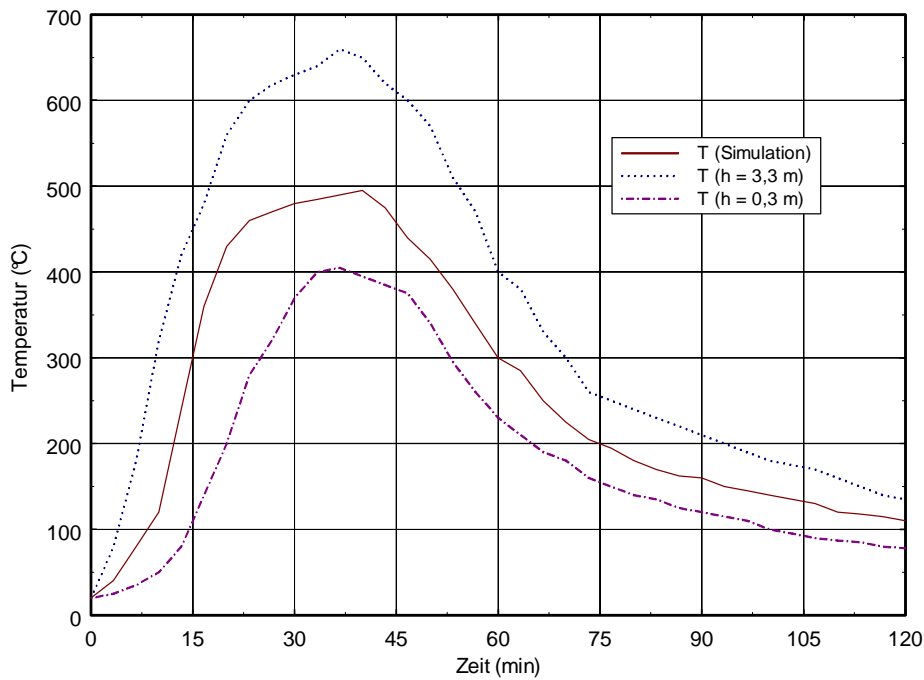


Bild 5.3 Vergleich der gemessenen Temperaturen beim Brandversuch mit den Werten aus der Berechnung mit HARVARD VI

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

$$\Delta T_p = T_\infty (\dot{Q}^*)^{2/3} \cdot \left(0,188 + 0,313 \cdot \frac{r}{z} \right)^{-4/3} \quad (5.8)$$

$$\dot{Q}^* = \frac{(1 - \chi_r) \cdot \dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot g^{1/2} \cdot z^{5/2}} \quad (5.9)$$

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]

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

$$\Delta T_p = 9,28 \cdot T_\infty (\dot{Q}^*)^{2/3} \quad (5.10)$$

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

$$\Delta T_p = 25,5 \cdot \frac{((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q})^{2/3}}{z^{5/3}} \quad (5.11)$$

$$T_p = T_\infty + \Delta T_p \quad (5.12)$$

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].

$$Z_f = 0,235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \cdot D_f \quad (5.13)$$

mit

Z_f mittlere Flammenhöhe [m]

D_f Branddurchmesser [m]

Da auch die Flammen aufgrund der Abkühlungseffekte in der Regel keine einheitliche Temperatur aufweisen, sind Ansätze entwickelt worden, die diesen Teil des Plumes einer differenzierten Betrachtung unterziehen [5.14, 5.16].

$$\Delta T_p = 78,4 \cdot \frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \quad \text{für } 0,08 \cdot \dot{Q}^{2/5} \leq z < 0,02 \cdot \dot{Q}^{2/5} \quad (5.14)$$

$$\Delta T_p = 25,5 \cdot \frac{((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q})^{2/3}}{z^{5/3}} \quad \text{für } 0,20 \cdot \dot{Q}^{2/5} \leq z \quad (5.15)$$

Der Ausdruck $0,08 \cdot \dot{Q}^{2/5}$ grenzt den Bereich ab, der direkt in den Flammen liegt. Unterhalb dieser Grenzhöhe wird die Flammentemperatur zugewiesen. Die Gültigkeit der obigen Gleichungen ist auf Bereiche beschränkt, in denen sich noch keine definierte Rauchgasschicht ausgebildet hat oder, gemessen an der Raumhöhe, diese noch von untergeordneter Bedeutung ist.

5 Modelle für die Brandsimulation

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 geringen Temperatur eingemischt, sondern die warmen oder heißen Rauchgase. In diesem Fall wird ein Ansatz für die Plume-Centerlinetemperatur verwendet, der diese veränderten Randbedingungen bei Eintritt in die Rauchgasschicht berücksichtigt. Das Grundkonzept dieses Ansatzes besteht darin, den realen Brandherd durch eine „virtuelle Wärmequelle“ zu ersetzen, die eine andere Energiefreisetzungsrate 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 $z_{1,1}$ benötigt. Diese Werte sind mit Hilfe der Brandsimulationsrechnung zu bestimmen. Im Folgenden soll die Anwendung dieses Ansatzes [5.17] beschrieben werden.

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

$$\dot{Q}_{i,1}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot g^{1/2} \cdot z_{i,1}^{5/2}} \quad (5.16)$$

mit

$\dot{Q}_{i,1}^*$	dimensionslose Energiefreisetzungsrate des realen Brandherdes [-]
\dot{Q}	Energiefreisetzungsrate des realen Brandherdes [kW]
ρ_∞	Gasdichte der Kaltgasschicht [kg/m^3]
c_p	spez. Wärmekapazität der Kaltgasschicht [kJ/kgK]
T_∞	Temperatur der Kaltgasschicht [K]
g	Erdbeschleunigung [m/s^2]
$z_{i,1}$	Distanz des realen Brandherdes zur Grenzfläche zwischen oberer und unterer Schicht [m]

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

$$\dot{Q}_{i,2}^* = \left[\frac{1 + C_T \cdot (\dot{Q}_{i,2}^*)^{2/3}}{C_T \cdot \xi} - \frac{1}{C_T} \right]^{3/2} \quad (5.17)$$

mit

- $\dot{Q}_{i,2}^*$ dimensionslose Energiefreisetzungsrate der „virtuellen Wärmequelle“ [-]
 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 $z_{i,2}$ der „virtuellen Wärmequelle“ zur Grenzfläche zwischen oberer heißer Rauchgasschicht und Kaltgasschicht ergibt sich zu:

$$z_{i,2} = z_{i,1} \cdot \left[\frac{\xi \cdot C_T \cdot \dot{Q}_{i,1}^*}{\left(\dot{Q}_{i,2}^*\right)^{1/3} \cdot \left[(\xi - 1) \cdot (\beta^2 + 1) + \xi \cdot C_T \cdot \left(\dot{Q}_{i,2}^*\right)^{2/3} \right]} \right]^{2/5} \quad (5.18)$$

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

$$H_2 = H_1 - z_{i,1} + z_{i,2} \quad (5.19)$$

und

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{i,2}^* \cdot \rho_s \cdot c_p \cdot T_s \cdot g^{1/2} \cdot z_{i,2}^{5/2} \quad (5.20)$$

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

$$\rho_0 \cdot T_0 = \rho_s \cdot T_s = 353 \text{ kg/m}^3\text{K} = \text{const.} \quad (5.21)$$

Aus diesen Werten wird jetzt die Temperatur unter der Decke ($r = 0$) berechnet, in dem die neuen Werte in Gleichung (5.15) eingesetzt werden:

$$T_p = T_s + 25,5 \cdot \frac{\left((1 - \chi_r) \cdot \dot{Q}_2 \right)^{2/3}}{H_2^{5/3}} \quad (5.22)$$

Zu der in der Heißgasschicht herrschenden Temperatur T_s wird die berechnete Temperaturerhöhung addiert und ergibt dann die Temperatur unter der Raumdecke über dem Brandherd.

Soll die Temperaturentwicklung in einem Abstand r von der Plume-Achse berechnet werden, so steht ein modifizierter Ansatz für die Ceiling Jet-Temperatur zur Verfügung [5.17].

5 Modelle für die Brandsimulation

$$\Delta T_{\text{jet}} = \frac{C}{r^\gamma} \quad (5.23)$$

$$C = k \cdot r_0^\gamma \cdot \Delta T_p \quad (5.24)$$

$$k = 0,68 + 0,16 \cdot (1 - e^{-d}) \quad (5.25)$$

$$r_0 = 0,18 \cdot H \quad (5.26)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} - \alpha \cdot (1 - e^{-d}) \quad (5.27)$$

$$T_{\text{jet}} = T_s + \Delta T_{\text{jet}} \quad (5.28)$$

mit

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

T_{jet} Ceiling Jet-Temperatur [°C]

$T_{\text{Heißgas}}$ Rauchgastemperatur [°C]

H Abstand Brandherd-Decke [m]

d Dicke der Rauchgasschicht [m]

α Konstante (0,44) [-]

Auch bei diesen modifizierten Ansätzen sind die Randbedingungen zu beachten. Genau wie bei den Ansätzen ohne Berücksichtigung der Rauchgasschicht ist auf die Ausdehnung und die Lage der Brandquelle zu achten. Beispielsweise verändern sich bei Brandquellen in der Nähe einer Wand oder einer Ecke die Einmischungsverhältnisse in den Plume, was zu veränderten Temperaturprofilen führt.

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:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.29)$$

$$E = c_v \cdot m \cdot T \quad (c_v = \text{spezielle Wärme bei konstanten Volumen}) \quad (5.30)$$

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (\text{Zustandsgleichung für ideale Gase, } R = \text{allg. Gaskonstante}) \quad (5.31)$$

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

Um einen vertieften Einblick in die Berechnungsmethoden im Brandschutz zu gewinnen, ist es zweckmäßig, sich mit den thermodynamischen Grundlagen der Berechnungen für einfache Geometrien vertraut zu machen. Das hier vorgestellte Einraummodell ist gewissermaßen die Urzelle der 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.

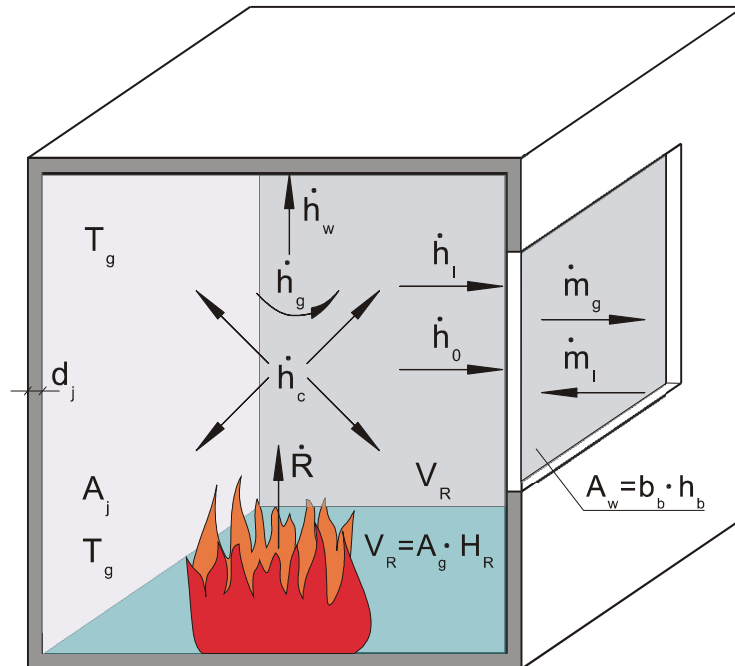


Bild 5.4 Geometrie, Wärme- und Massenströme des Wärmebilanzmodells

Die innere umschließende Fläche wird mit A_j , 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:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_l + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0 \quad (5.32)$$

Folgende Energieterme sind darin enthalten:

- \dot{h}_c die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandnebenserscheinungen 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

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_l + \dot{R}) = 0 \quad (5.33)$$

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

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 wird 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 Luftschicht.

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 Temperatur.

Die Fluide innerhalb der Zonen werden als ruhend angenommen (außer Plume 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 Luftschicht usw. realistischer zu beschreiben. Die Unterscheidung von mindestens zwei Zonen führt zu einer größeren Anzahl von Bereichen mit unterschiedlicher Temperatur und Emissivität. Die Berechnung des Strahlungsaustausches zwischen Flammen, Wänden und Objekten trägt wesentlich zu dem höheren Detaillierungsgrad der Mehrzonenmodelle bei.

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

$$\begin{aligned}\rho_i &= \frac{m_i}{V_i} \\ E_i &= c_v \cdot m_i \cdot T_i \\ p &= R \cdot \rho_i \cdot T_i \\ V &= V_s + V_i\end{aligned}\tag{5.34}$$

5 Modelle für die Brandsimulation

mit

V_s = Volumen der Rauchgasschicht

V_l = Volumen der Luftschicht

\dot{m}_p = Plume-Massenstrom

z_s = Höhe der Rauchschichtuntergrenze

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 Energiefreisetzungsrates als zeitlicher Verlauf vorgegeben werden. Allerdings wird die Flamme oder der Plume differenzierter behandelt, da hier eine Strahlungsquelle vorliegt, deren Energie nicht mehr nur einem Volumen zufließt, sondern zwei Schichten. Weiterhin werden neben dem Sauerstoff noch andere Spezies beschrieben. Es handelt sich beispielsweise um die bei der Verbrennung freiwerdenden gasförmigen Bestandteile wie CO_2 , CO und HCN oder die Rußpartikel, welche für die Sichteintrübung des Rauchgases verantwortlich sind. Zur Bilanzierung dieser Produkte ist ein weiterer Erhaltungssatz (Erhaltung der Spezies) 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 Brandraums. 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 Energiefreisetzungsrates 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, wuchsen auch die Anforderungen an die numerischen Methoden. Bei Simulationsrechnungen, die mehrere Räume umfassen, steigt nicht nur die Rechenzeit an, sondern auch die Möglichkeit, dass die Algorithmen nicht konvergieren. Deshalb wurden in den vergangenen Jahren die numerischen Methoden verbessert.

Die Mehrzonenmodelle sind international anerkannt als Hilfsmittel zur Beurteilung der sich bei unterschiedlichen Ventilationsverhältnissen und Brandentwicklungen einstellenden Rauchgasschicht [5.1, 5.3, 5.4, 5.5, 5.7, 5.8]. Diese ist für die Beurteilung der Möglichkeiten zur Flucht und Rettung von Personen aus dem Brandraum sowie zur Brandbekämpfung

5 Modelle für die Brandsimulation

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 Luftschichten wird über Einmischströme und somit über die Bilanz des Plumes hergestellt.

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

Räume im Sinne des Rechenprogramms können sein:

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

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 viel 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 m² zeigen, kann sich hier durchaus eine stabile Schichtung ausbilden, Experimente bei noch größeren Flächen liegen bisher nicht vor. Bei Flächen in der genannten Größenordnung ist jedoch darauf zu achten, dass der Abstand der Rauchgasgrenze zu den Zuluftöffnungen ausreichend groß ist, da mit abnehmender Rauchgastemperatur auch die Schichtungsstabilität abnimmt. Bis zum Vorliegen exakteren Begrenzungen kann man sich hier an den diesbezüglichen Anforderungen der DIN 18232-2 orientieren.

5.3.4 Feldmodelle (CFD)

Die Ausführungen zu den Grundlagen der Feldmodellierung in diesem Leitfaden beschränken sich auf Brandszenarien, die hinsichtlich der Wärmefreisetzungsrates, 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-Gemisches. 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, 5.24 - 5.27].

Die in den jeweiligen Bemessungsbrandszenarien enthaltenen Vorgaben zur Brandleistung (Wärmefreisetzungsrates, 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

5 Modelle für die Brandsimulation

brandlastgesteuerten zu einem ventilationsgesteuerten Abbrand lässt sich dabei entweder indirekt durch Auswertung der Ventilationsraten oder direkt durch die Analyse der lokalen Sauerstoffkonzentration berechnen.

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 sich trübenden 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 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 Lösungsverfahren 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.

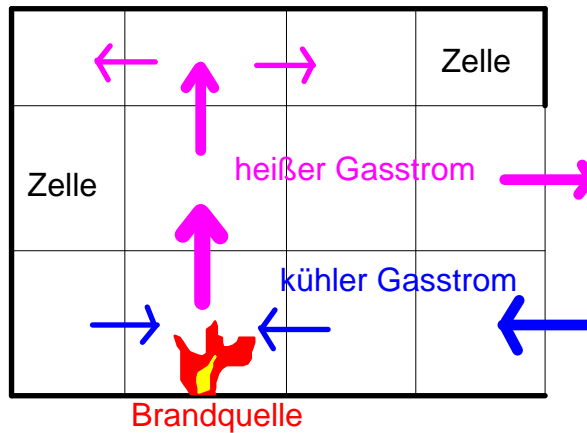


Bild 5.5 Schematische (zweidimensionale) Darstellung der zwischen den Zellen eines Rechengitters ablaufenden physikalischen Prozesse zum Austausch von Energie, Masse und Impuls.

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

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, die 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 dimensionslose 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. Daher wurden verschiedene Näherungsverfahren (Turbulenzmodelle) entwickelt, um bestimmte Einflüsse der Turbulenz auch ohne explizite Berechnung kleinskaliger Wirbel zu berücksichtigen. Bei der „Direkten Numerischen Simulation“ (DNS) bzw. der „Large Eddy Simulation“ (LES) versucht man, zumindest diejenigen für die Rauch- und Wärmeausbreitung relevanten Wirbel direkt aufzulösen. 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 Plumbreite 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) oder das k - ϵ -Turbulenzmodell (Beschreibung von Turbulenzeffekten durch zusätzliche Variablen in den hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen).

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 Temperaturreandbedingungen 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.

Freien Randflächen stellen eine künstliche Begrenzung des Rechengebietes dar, an welchen die lokalen Druck- und Temperaturwerte sowie die Gasgeschwindigkeiten 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 leicht berechnet werden kann.

Bei den freien Randbedingungen im eigentlichen Sinne ist weiter zu unterscheiden zwischen Öffnungen im baulichen Sinne (also Türen, Fenster oder natürliche Rauchabzüge) die am Rande des Rechengitters liegen (Variante 1) und einem Szenarium, bei welchem sich diese baulichen Öffnungen innerhalb des Rechengitters befinden (Variante 2). In Variante 2 beschreiben die freien Randbedingungen einen Abschluss des Rechengitters in einiger Entfernung von den Umfassungsbauteilen, der einen Übergang in die weitere, nicht mehr durch das Gitter erfasste Umgebung darstellt.

Variante 2 ist vorzuziehen, insbesondere für Szenarien mit ausschließlich natürlicher Ventilation, da die Gasströmung im Bereich der Öffnungen in diesem Falle lokal aus der Lösung der hydrodynamischen Grundgleichungen bestimmt wird. Der für den Ein- und Ausstrom in das zu betrachtende Gebäude 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 kaum noch, so dass als Randbedingung eine Gradient der Geschwindigkeit von Null an der freien Randfläche vorgegeben werden kann. Mit dieser Methode ist es auch möglich, den Einfluss von Wind durch entsprechende Druck- bzw. Geschwindigkeitsrandbedingungen zu simulieren.

Bild 5.6 zeigt ein mit einem Feldmodell berechnetes Beispiel für eine freie Randbedingung entsprechend Variante 2. Aus dem Raum auf der linken Seite strömen heiße Brandgase durch eine Türöffnung in die Umgebung, während kühle Luft aus der Umgebung einströmt. Das Rechengitter erstreckt sich auf den für den Gasaustausch relevanten Bereich der Umgebung.

Variante 1 erfordert dagegen die Definition zusätzlicher geeigneter Randbedingungen zur Bestimmung der Gasströmung zwischen Raum und Umgebung außerhalb des Rechengitters (z. B. Lösung der Bernoulli-Gleichung für einzelne diskrete Stromfäden in Kombination mit einer Bilanzgleichung für die beteiligten Massenströme), da hier die Annahme eines verschwindenden Geschwindigkeitsgradienten senkrecht zur freien Randfläche nicht mehr gerechtfertigt ist.

5 Modelle für die Brandsimulation

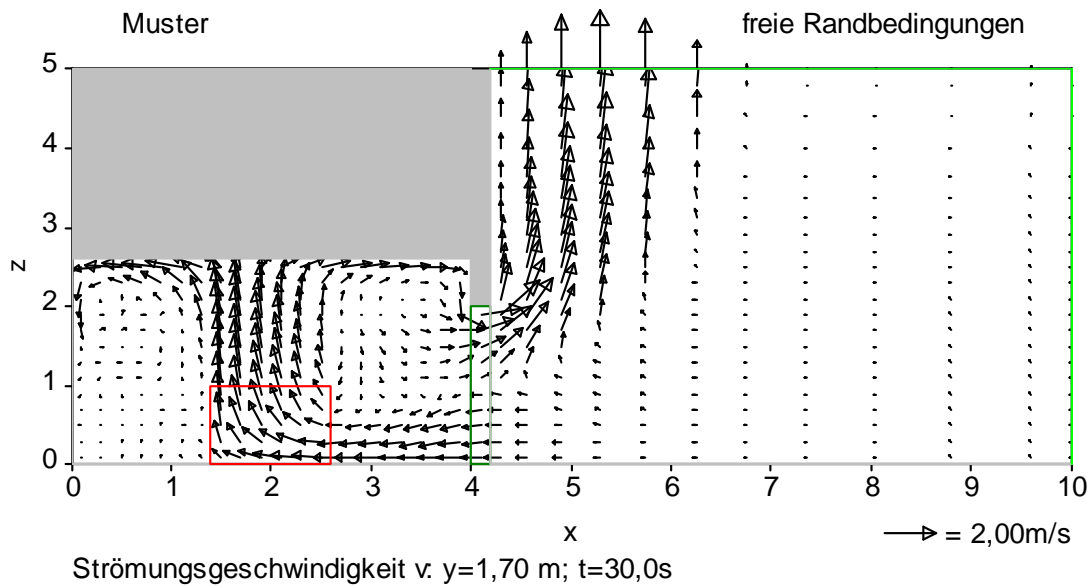


Bild 5.6 Beispiel einer innerhalb des Rechengitters liegenden baulichen Öffnung (CFD-Simulation mit einem Feldmodell). Dargestellt ist ein Längsschnitt durch das dreidimensionale Szenario in Höhe der Türe des Brandraums.

5.4 Beschreibung der Physikalischen Modelle

5.4.1 Allgemeines

Brandversuche in maßstäblichen Modellen dienen vorrangig der Untersuchung von Rauchgasströmungen in Gebäuden und der Dimensionierung der Rauchableitungseinrichtungen.

Die Strömungsvorgänge im Gebäude werden geprägt durch den sich oberhalb der Brandquelle entwickelnden Thermikstrahl, der als anisothermer Luftfreistrahler im Raum wirkt.

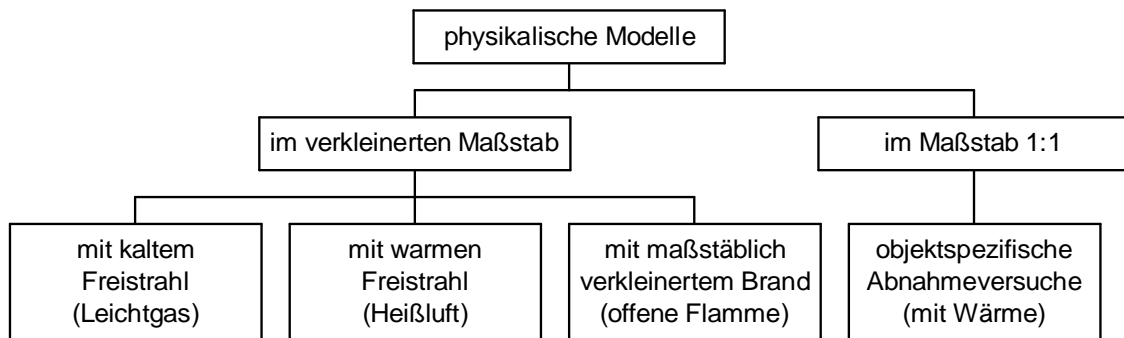
Im Gegensatz zu isothermen Freistrahlen, bei denen die Volumenzunahme durch Induktion direkt proportional zur Lauflänge erfolgt, wächst beim gegenüber der Umgebung wärmeren Strahl das Volumen überproportional zur Strahllänge an. Der Exponent der Volumenzunahme wurde mit ca. $\frac{5}{3}$ nach [5.39, 5.40] festgestellt.

Da aus zahlreichen Versuchen bekannt ist, dass Thermikstrahlen geringer Übertemperatur nahezu gleiches Strahlausbreitungsverhalten zeigen wie Thermikstrahlen hoher Temperatur, entsprechen auch die weiteren Strömungsmechanismen analogen Gesetzmäßigkeiten [5.41, 5.42].

Man unterscheidet Untersuchungen an verkleinerten Modellen und objektspezifischen Abnahmeversuchen im Maßstab 1:1.

Verkleinerte Modelle können durchgeführt werden durch Nachbildung des

- Thermikstrahles oder durch
- Maßstäblich verkleinerte Realbrände.



5.4.2 Modellgesetzmäßigkeiten (Ähnlichkeitskriterien)

Eine in vielen Bereichen mit sehr gutem Erfolg eingesetzte Technik zur Beurteilung von Strömungsprozessen ist die labortechnische Untersuchung in Modellen mit verkleinertem Maßstab.

Grundsätzlich gilt: Zwei physikalische Vorgänge sind ähnlich, wenn sie physikalisch gleichartig und wenn alle Größen, die die betrachteten Vorgänge beeinflussen, also auch die Randbedingungen, ähnlich sind [5.43, 5.44].

Die Modellstudien in Bezug auf die Raumluftrömung wurden in den 60er und 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts entwickelt und erprobt. Sie haben sich in zahlreichen Anwendungen bestens bewährt und auch der Nachweis der Übertragbarkeit konnte in zahlreichen Fällen eindrucksvoll nachgewiesen werden.

Die Vorschriften für Modellversuche gewinnt man aus den Größenbeziehungen, die den betrachteten physikalischen Vorgang beschreiben; bei anisothermen, turbulenten Strömungen sind es folgende Differentialgleichungen:

- Bewegungsgleichungen
- Energiegleichungen
- Wärmeübergangsgleichungen

Die Bewegungsgleichungen, bekannt unter dem Namen erweiterte Navier-Stokes'sche Gleichungen, geben das Gleichgewicht der auf eine Volumeneinheit bezogenen Kräfte wieder.

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 durch die laminare Strömung transportierten Wärmestrom.

Für turbulente anisotherme Strömungen lassen sich aus den Bewegungsgleichungen folgende Ähnlichkeitskennzahlen ableiten:

5 Modelle für die Brandsimulation

$$\text{Re-Zahl} \quad \text{Re} = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} \quad (5.35a)$$

$$\text{Eu-Zahl} \quad \text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho \cdot v^2} = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Trägheitskraft}} \quad (5.35b)$$

$$\text{Ar-Zahl} \quad \text{Ar} = \frac{g \cdot l \cdot \Delta \vartheta}{T_\infty \cdot v^2} = \frac{\text{Auftriebskraft}}{\text{Trägheitskraft}} \quad (5.35c)$$

$$\text{Fr-Zahl} \quad \text{Fr} = \frac{v^2}{l \cdot g} = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Schwerkkräfte (Auftriebskraft)}} \quad (5.35d)$$

Aus der Energiegleichung folgt im Wesentlichen die Prandtlzahl.

$$\text{Prandtl-Zahl} \quad \text{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (5.35e)$$

Die Wärmeübergangsgleichung liefert das Ähnlichkeitskriterium nach Nusselt:

$$\text{Nusselt-Zahl} \quad \text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (5.35f)$$

Bei Versuchen an verkleinerten Modellen mit Realbränden ist die Ähnlichkeit der Wärmefreisetzung zwischen Modell und Natur zu beachten. Sie wird nach Heskestad [5.39] durch die dimensionslose Wärmefreisetzungsrates \dot{Q}^* beschrieben:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g \cdot D} \cdot D^2} \quad (5.36)$$

Mit \dot{Q} = Wärmefreisetzungsrates, ρ_∞ und T_∞ = Umgebungsdichte und -temperatur, g = Erdbeschleunigung, c_p = spezifische Wärmekapazität und D = Brandherddurchmesser.

Durch Müllejans [5.50], Bach [5.51] und viele andere ist nachgewiesen, dass bei freien, turbulenten Strömungen die Re-Zahl von untergeordnetem Einfluss bleibt, so dass die den Strömungsvorgang beschreibenden Größen Ar und an der Systemgrenze Eu einzuhalten sind.

5.4.3 Besonderheit der 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 Plate [5.45] und Gerhardt [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

$$J_e = \frac{h}{z_0} \quad (5.37)$$

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.

5.4.4 Geometrischer Modellmaßstab und Modellgestaltung

Eine notwendige Bedingung für Untersuchungen von Strömungsprozessen in Modellen mit verkleinertem Maßstab ist es, dass die Strömungen sowohl in der Natur als auch im Modell voll ausgebildet turbulent ablaufen. Hierfür ist $Re > 10.000$ nachzuweisen.

Nur unter dieser Voraussetzung gilt die Vereinfachung, dass die Re-Zahl ohne Einfluss bleibt.

Um diese Bedingung zu erfüllen, müssen die Modelle zur Untersuchung möglichst groß gewählt sein.

Als Erfahrungswerte haben sich folgende Größen bewährt:

Modellmaßstab $M \geq 1:20$ (für übliche Gebäudeabmessungen)

1:30 (für große Gebäude)

jedoch sollten die Raumhöhen im Modell mindestens 300 mm betragen.

Bei kleineren Modellen $M < 1:20$ sind Abweichungen zwischen Natur- und Modellströmung zu erwarten, die in der Regel zu einer Überdimensionierung der Entrauchungsmaßnahme führen.

Eine Ausnahme bildet die Strömungssituation bei der Gebäudeaerodynamik, da durch Ablöseeffekte an scharfkantigen Gebäudemodellen die Gesamtströmung im Windkanal als ausgebildet turbulent betrachtet werden kann.

Bei Berücksichtigung von Windeinflüssen müssen Modelluntersuchungen daher in einem Grenzschichtwindkanal durchgeführt werden. Hier bestimmt i. A. die Größe des Windkanals

5 Modelle für die Brandsimulation

die Größe der Modelle. Typische Modellmaßstäbe sind 1:50 und 1:100 für sehr große Gebäude. Damit sind Auswirkungen auf innere Raumströmungen ableitbar.

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.

5.4.5 Umrechnung physikalischer Größen (Ähnlichkeitsfaktoren)

Die Umrechnung der einzelnen physikalischen Größen erfolgt auf der Basis von Ähnlichkeitsfaktoren. Jede Ähnlichkeitskennzahl lässt sich durch entsprechende Ähnlichkeitsfaktoren darstellen.

So wird aus:

$$\frac{Ar_M}{Ar_0} = 1 = \frac{f_g \cdot f_l \cdot f_{\Delta\vartheta}}{f_{T_\infty} \cdot f_v^2} = \frac{\text{Archimedeszahl (Modell)}}{\text{Archimedeszahl (Original)}} \quad (5.38)$$

Die Ähnlichkeitsfaktoren stellen den Quotienten der entsprechenden physikalischen Größen im Modell und im Original dar, z. B.

$$f_l = \frac{l_M}{l_0}; f_{\Delta\vartheta} = \frac{\Delta\vartheta_M}{\Delta\vartheta_0}; \text{ usw.} \quad (5.39)$$

Wählt man den Modellmaßstab, so müssen die übrigen Ähnlichkeitsfaktoren so gewählt sein, dass die oben angegebene Beziehung eingehalten ist.

Ferner gilt für die Wärmeleistung:

$$f_{\dot{Q}} = f_v \cdot f_c \cdot f_p \cdot f_{\Delta\vartheta} \quad (5.40)$$

und für den Zeitfaktor ergibt sich:

$$f_t = \frac{f_l}{f_v}, \quad (5.41)$$

wenn l die Länge und v die Geschwindigkeit bezeichnet.

Für die Umrechnung der wesentlichsten Größen Strömungsgeschwindigkeit, Wärmefreisetzung und Temperatur gilt:

$$v_0 = \frac{v_M}{\sqrt{\frac{l_M}{l_0} \cdot \frac{\Delta\vartheta_M}{\Delta\vartheta_0}}} \quad (5.42)$$

$$Q_M = Q_0 \cdot \left(\frac{I_M}{I_0} \right)^{2,5} \quad (5.43)$$

$$t_M = t_0 \cdot \sqrt{\frac{I_M}{I_0}} \quad (5.44)$$

Grundsätzlich gilt nun, dass die Wahl des betrachteten Ortes für die einzelnen Größen in der Hauptausführung und im Modell frei ist. Die Messorte müssen sich jedoch geometrisch entsprechen. D. h. die Zweckmäßigkeit der Wahl ist ausschlaggebend und muss der Aufgabenstellung der Versuche entsprechen.

5.4.6 Merkmale des Realbrandes und seine Umsetzung im Modell

Brandeffekte im Original und im Modell

Brandeffekt	realisierbar im Modell (verkleinert)
Realtemperaturen	Ja, Temperaturfelder sind ähnlich; bei Maßstabsgrößen < 1:10 mit höheren Messunsicherheiten verbunden
Wärmefreisetzung	Ja, kann umgerechnet werden
Rauchgasstrom	Ja, Plume-Gleichungen gelten auch im Modell
Rauchgasausbreitung	Ja, Ähnlichkeit der Strömungsprozesse
Abluftstrom	Ja, Ähnlichkeit der Strömungsprozesse, umrechenbar
Flammenausbildung	Ja, $\geq 1:5$, Flammenhöhe, Temperatur und Strömung in der Flamme
Raucharme Schicht	Ja, Beobachtung
Wärmebelastung von Bauteilen	nein

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 Spurengasmethode quantifiziert werden. Hierzu wird dem simulierten Brandgeschehen ein Spurengas beigemischt und die Spurengaskonzentration mittels geeigneter Verfahren, z. B. Flammenionisationsdetektor oder Infrarotspektrometer, gemessen. Das Verhältnis von Ausgangskonzentration C_0 zu örtlich gemessener Konzentration C wird als Verdünnungsverhältnis $V = C_0/C$ bezeichnet.

Bei Brandversuchen an verkleinerten Modellen kann die Rauchausbreitung zusätzlich mittels Temperaturmessung überprüft werden. Die örtliche Verdünnung von Brandgasen kann durch die Bestimmung von Rauchgasanteilen des Modellbrandes oder durch die Temperaturabnahme – relativ zur mittleren Rauchgastemperatur im Flammenbereich – quantifiziert werden.

5.4.7 Objektspezifische Abnahmeversuche (M 1:1)

Objektspezifische Abnahmeversuche 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 realitätsnahe Ergebnisse liefern können.

Zur praktischen Überprüfung von Rauchgasströmungen im Gebäude können erwärmte Luft oder offene Poolbrände mit flüssigen Brennstoffen eingesetzt werden. Zur Visualisierung der Rauchgasströmungen werden der Auftriebsströmung meist Aerosole aus Nebelfluiden oberhalb der Flammezone beigemischt. Detaillierte Ausführungen zu Abnahmeversuchen können dem technischen Bericht der VFDB [5.48] bzw. der VDI-Richtlinie 6019 Blatt 1 [5.49] 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.
- Raumluftechnische Anlagen müssen wie geplant vorhanden und entsprechend dem Konzept der Rauchableitung funktionieren.
- Die Gebäudehülle und die öffnungsschließenden Elemente müssen vollständig vorhanden und funktionsfähig sein.

Die Versuche sind ausreichend zu dokumentieren.

Zur Durchführung objektspezifischer Abnahmeversuche stehen folgende Verfahren zur Verfügung

- Erwärmte Luft (bis ca. 150 kW Wärmefreisetzung)
- Erwärmte Luft (bis ca. 1,5 MW Wärmefreisetzung mit Gasbrennern bzw. Lachenbränden)

Mit dieser Methode können sowohl niedrig- als auch hochenergetische Brände simuliert werden. Bei der Nachbildung hochenergetischer Brände sind die Übertragungsfunktionen aus der Ähnlichkeitslehre der Strömungsmechanik anzuwenden.

5.4.8 Vergleichsuntersuchungen

Im Rahmen der Erstellung des Leitfadens wurden zum Vergleich unterschiedlicher Methoden und Modelle folgende Untersuchungen durchgeführt:

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

Die wesentlichen Ergebnisse sind in den Tabellen 5.2 und 5.3 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 Wärmefreisetzungsrate von 3.590 kW durchgeführt werden.

Tabelle 5.2 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. Erwartungsgemäß größere Abweichungen ergeben sich für die Zonenmodelle, da bei diesem Versuchsaufbau der Plume sich direkt im Zuluftstrom befand und so durch eine starke Plumeneigung und entsprechender Verwirbelung sich keine eindeutige Schichtbildung einstellte.

Tabelle 5.3 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.

5.4.9 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 entspre-

5 Modelle für die Brandsimulation

chenden 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).

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 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, der einfach vorzunehmenden Parameterveränderungen hinsichtlich der Strömungsverhältnisse und baulicher Einflussgrößen am Modellkörper mit der sofortigen Bewertbarkeit ihrer Einflüsse auf das Ergebnis.

Tabelle 5.2 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	FIGARO	MRFC	phys. M. Imtech	phys. M. IfI	phys. M. BCL	Original- versuch
Brandleistung [kW]	3.590	3.590	3.240	4.500	4.500	3.590	3.590 ^{*)}	3.170 ^{*)}	66,4	3.167
Strahlungsanteil [%]	20	20	20	20	20	20				
Temperatur in Schlot 1 [°C]	160	140	139	180	310		159	125	155	140
Temperatur in Schlot 2 [°C]	170	133	140	180	310		158	125	165	160
Ström.geschw. in Schlot 1 [m/s]	4-7	4,7	5,3	5,9	4,9	6,0	5,2	4,2	5,0-6,0 ^{*)}	5,5
Ström.geschw. in Schlot 2 [m/s]	4-7	4,2	5,6	6,2	4,9	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	4,8	5,0	1,5-2,0	1,5		**)
Rauchgastemperatur [°C]	185	140	130	180	315	220	140	120		180
Zuluftgeschwindigkeit [m/s]		3,1	2,9	3,5	2,1		3,1		3,4 ^{*)}	3,0
CO ₂ -Konzentration [Vol.-%]	0,8		3,2	0,9	2,0	1,0				1,0
Modellmaßstab							1:4	1:20	1:5	1:1

^{*)} Umrechnung vom Modell

^{**)} Es wurde keine signifikante Schichtung festgestellt; aus den Messdaten kann die Dicke der raucharmen Schicht nicht sicher bestimmt werden. Sie lag im Bereich der Zuluft etwa bei OK Tor, d. h. bei ca. 2,0 m

Tabelle 5.3 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	FIGARO	MRFC	phys. Modell Imtech		phys. M. IfI	Original- versuch
Brandleistung [kW]	3.590	4.500	4.500	3.590	3.590 ^{*)}	4.400	3.590 ^{*)}	4.450
Strahlungsanteil [%]	20	20	20	20				
Temperatur in Schlot 1 [°C]	122	130	65		113	161		200
Temperatur in Schlot 2 [°C]	176	110	65		120	168		150
Ström.geschw. in Schlot 1 [m/s]	2,6	4,5	1,75	6,0	3,3 ^{**)}	3,5		5,5
Ström.geschw. in Schlot 2 [m/s]	4,4	3,5	1,75	6,0	4,8 ^{**)}	4,7		5,5
Dicke der raucharmen Schicht [m]	6,8	6,0	9,6	5,8	6,8-7,0	6,0	4,5	6,0
Temperatur im Brandraum [°C]		800	550	800				800
Rauchgastemperatur [°C]	125	110	160	120	115	150	125	160
Zuluftgeschwindigkeit [m/s]	2,2	2,3	1,1		2,6	2,1		2,6
CO ₂ -Konzentration [Vol.-%]		1,4	1,3	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 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 können im Rahmen der Entwicklung eines Verfahrens wichtig sein, sind zum Nachweis der Tauglichkeit für die Anwendungspraxis jedoch meist wenig brauchbar.

Für eine erfolgreiche Validierung sind als grundlegende Voraussetzungen notwendig: 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. Gerade 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 unbekanntes 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.

5 Modelle für die Brandsimulation

durch bekannte Zusammenhänge zu ergänzen (z. B. hinsichtlich flächenspezifischer Wärme-freisetzungsrates 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 Experimentes verglichen. Diesem Vergleich kann eine Prüfung auf Plausibilität der Rechenergebnisse vorausgehen, im Allgemeinen erübrigt sich aber dieser Schritt wegen des unmittelbaren Vergleichs mit den experimentellen Daten. Je mehr Werte unmittelbar verglichen werden können, um so 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 Heißgastemperatur in Zonenmodellen und einer Messstelle im Versuch angeführt. Die errechnete Heißgastemperatur 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, d. h. dass tatsächlich physikalisch äquivalente Größen miteinander verglichen werden.

Für eine erfolgreiche Verifikation muss das Rechenmodell Kriterium 1 immer erfüllen. Beim Kriterium 2 ist Vorsicht angeraten. Gerade bei Temperaturvergleichen, die oftmals als einzige zumindest aber als wesentliche Verifikationsgrundlage verwendet werden, können Inter-

pretationsprobleme auftreten. Hier ist sicherzustellen, dass sich die errechneten Werte mit den gemessenen Werten vergleichen lassen.

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

Im Folgenden werden die in Kapitel 5.3.1 angegebenen Gleichungen eingesetzt, um die Deckentemperaturen über dem Brandherd bei Poolbrandversuchen mit Spiritus zu bestimmen. Dabei handelt es sich um Versuche, die in einem Brandofen mit ca. 40 m² Grundfläche und einer lichten Raumhöhe von ca. 6,20 m durchgeführt wurden [5.18].

Bei den dort durchgeführten Versuchen wurde die Größe des Spiritus-Pools und damit die Energiefreisetzungsrate 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.

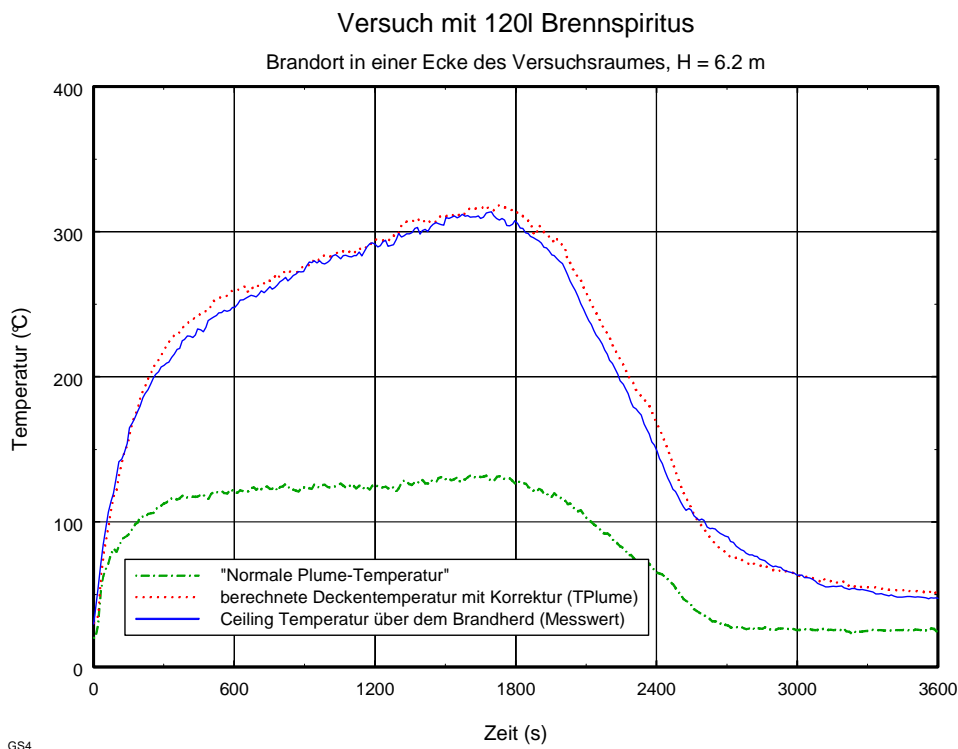


Bild 5.7 Gemessene und berechnete Deckentemperatur bei einem Poolbrand mit ca. 1 MW Brandleistung; Eckenposition des Brandherdes [5.19]

5 Modelle für die Brandsimulation

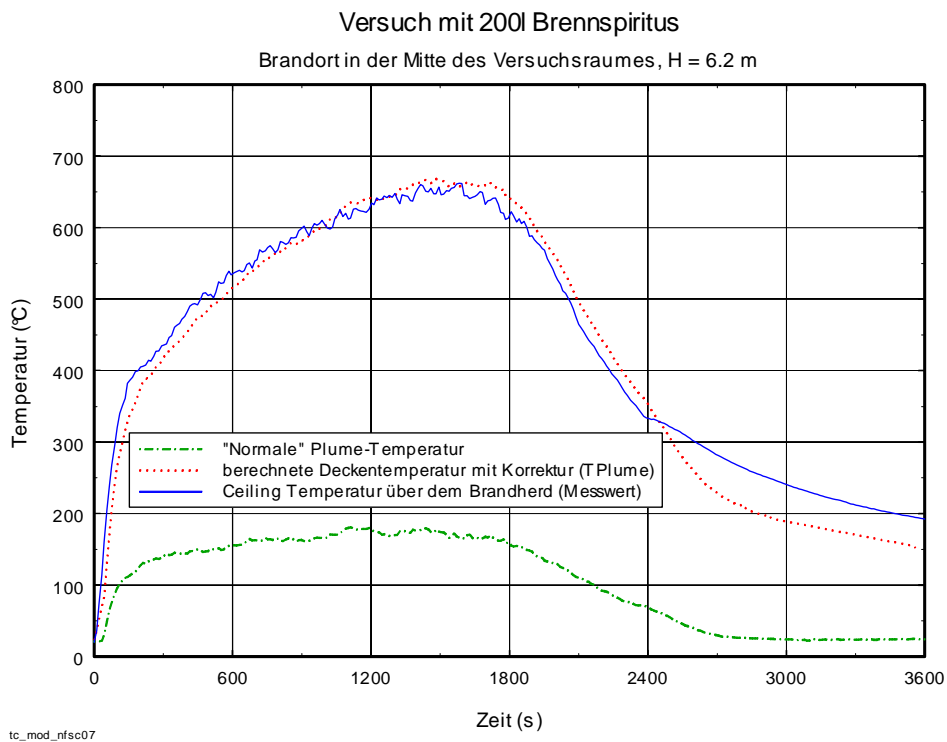


Bild 5.8 Gemessene und berechnete Deckentemperatur bei einem Poolbrand mit ca. 1,8 MW Brandleistung; Brandherd in der Mitte des Brandofens [5.15]

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].

Weitere Vergleiche der nach den Gleichungen (5.15) bis (5.22) berechneten Temperaturen mit den Messwerten aus Großbrandversuchen [5.17] ergeben, dass der obige Ansatz die Versuchswerte gut annähert (Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4 Vergleich zwischen Messwerten und Formeln

Q [MW]	ΔT_p Messwert [K]	ΔT_p Gl. (5.22) [K]
7,7	102	98
15,7	116	126
33	222	217

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 Plumbereich zurückzuführen sind. Bei der Auslegung von Bauteilen ist daher zu prüfen, ob mittlere Temperaturwerte oder die mit Hilfe der obigen Gleichungen berechenbaren lokalen Maximaltemperaturen herangezogen werden. Dies ist insbesondere bei Fachwerkstäben oder Unterspannungen, als Teil komplexer Tragkonstruktionen, ratsam. Die Verwendung von mittleren Temperaturwerten ist im Einzelfall zu begründen.

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.

5 Modelle für die Brandsimulation

Für die Bewertung von Atrien oder Hallen wurden zwei Brandexperimente ausgewählt. Das erste fand in einem Atrium mit den Abmessungen (L x B x H) 30 m x 24 m x 26,3 m statt, bei dem ein Poolbrand eine Brandleistung von 1,3 MW erzeugte [5.32]. Die Zulufffläche betrug 3,2 m² und die RWA-Fläche in den seitlichen Umfassungswänden 6,4 m². 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 5.9 und 5.10 dargestellt. Daraus folgt, dass die experimentellen Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben werden und die dargestellten Differenzen die Fehlerbandbreite markieren.

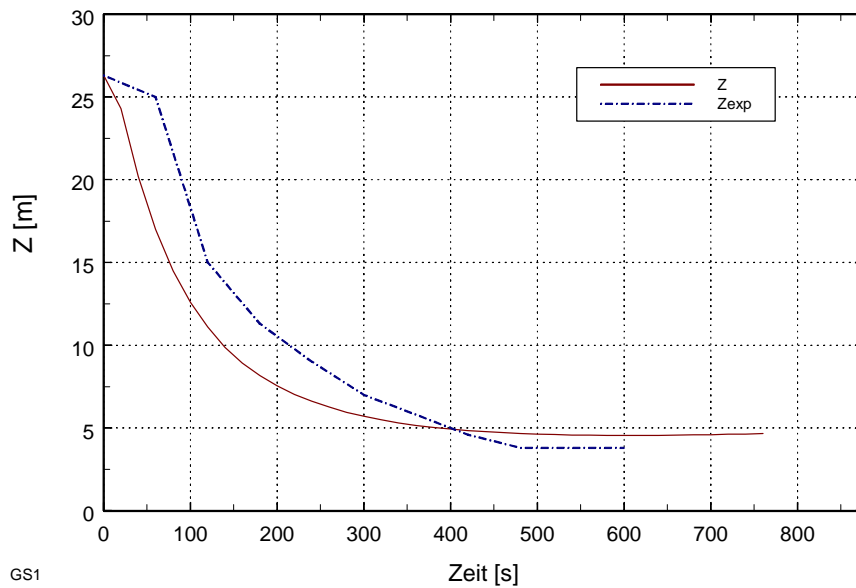


Bild 5.9 Vergleich der rauchgasfreien Schicht im Experiment und nach Berechnung

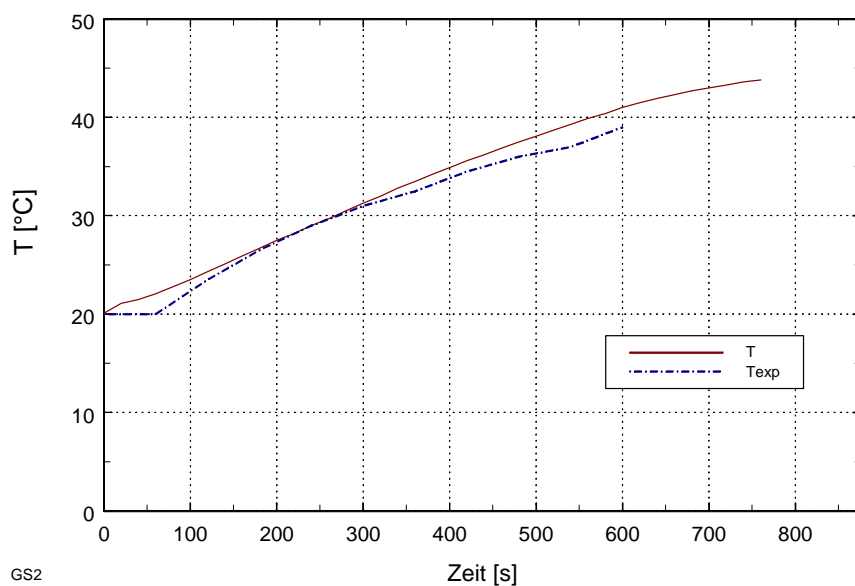


Bild 5.10 Vergleich der mittleren Rauchgastemperatur im Experiment und nach Berechnung

Das zweite Experiment fand in einem Flugzeughangar statt (90 m x 54,2 m x 15 m, L x B x H) [5.33], bei dem zwei unterschiedliche Brandverläufe untersucht wurden. Innerhalb dieses Raums erfolgte die Abtrennung eines Areals durch Rauchschürzen (20 m x 21 m), die bis auf eine Höhe von 12 m herabreichten. Aufgrund der leichten Dachwölbung entstand dadurch ein Rauchreservoir von 2,5 m - 3 m Höhe. Die Zuluftfläche bei diesen Experimenten betrug 16 m² und die Rauchabzugsfläche im Dach 68 m². Dabei waren folgende Ergebnisse zu verzeichnen:

Sz. 1 (4 MW): Temperatur 50 °C - 55 °C,

Sz. 2 (36 MW): Temperatur 165 °C - 180 °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 5.11 und 5.12 dargestellt.

Man erkennt, dass sich die berechneten Temperaturwerte an den gemessenen Obergrenzen befinden oder leicht darüber liegen. Hinsichtlich der Rückhaltung der Rauchgase im Reservoir wird ein stärkeres Abströmen aus dem Reservoir vorhergesagt, d. h. die rauchgasfreie 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.

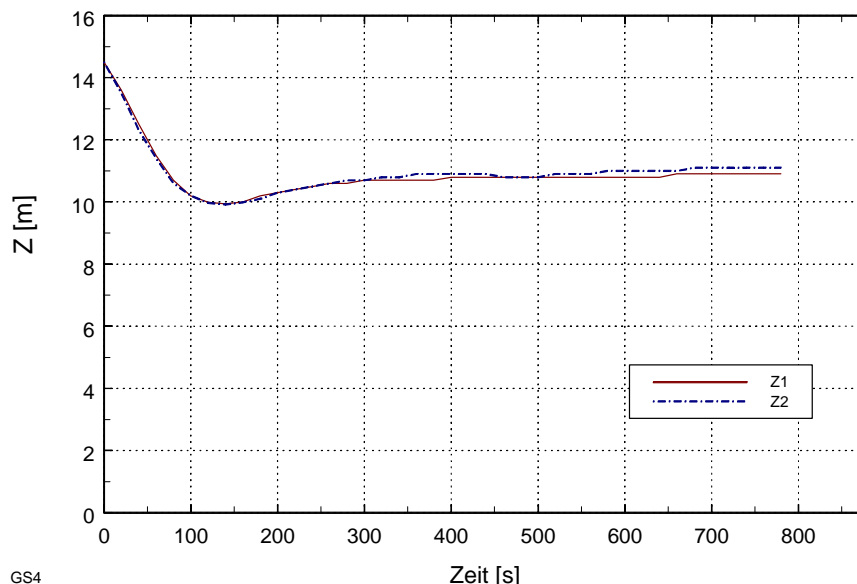


Bild 5.11 Dicke der rauchgasfreien Schicht nach Berechnung für die beiden Brandsszenarien (4 MW und 36 MW)

5 Modelle für die Brandsimulation

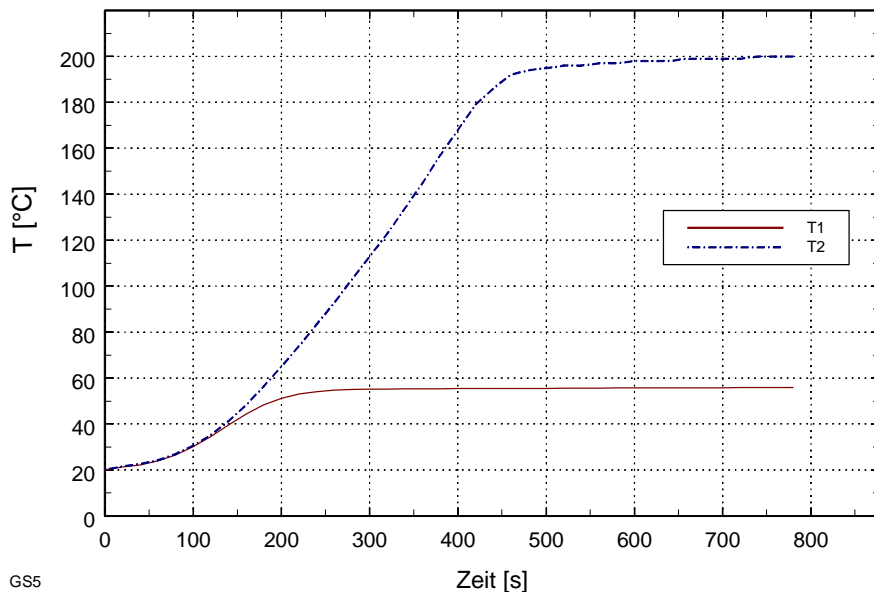


Bild 5.12 Mittlere Rauchgastemperatur nach Berechnung für die beiden Brandsszenarien (4 MW und 36 MW)

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 sehr hohen Räumen und bei Randbedingungen erreicht, bei denen Zuluftinflüsse dominieren. Exakte Abgrenzungen können bisher jedoch nicht angegeben werden, da diesbezügliche Experimente fehlen. Die Anwendungsgrenzen können momentan nur über vergleichende Berechnungen von Beispielen angenähert werden. Dies wird anhand von zwei Beispielen demonstriert.

Das erste Beispiel behandelt den Fall von Zuluftinflüssen. 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 5.13 und 5.14 dokumentiert. Die dargestellten Ergebnisse korrespondierten mit den durchgeführten Rauchversuchen.

Es wurden folgende Randbedingungen untersucht:

Das Bürogeschoss wird durch eine langgestreckte rechteckige Grundfläche angenähert. Dieser Raum hat eine Länge von 150 m, eine Breite von 20 m und eine Höhe von 3,13 m.

Die untergehängte offene Rasterdecke wird durch quer angebrachte Streifen einer Breite von 2 cm und einer Höhe von 20 cm simuliert. Diese Streifen befinden sich in der Höhe 2,67 m bis 2,87 m über dem Boden.

An den beiden Längsseiten befinden sich insgesamt 9 Türen mit einer Breite von 0,8 m und einer Höhe von 2,5 m. In der vorderen Wand befinden sich 5, in der hinteren 4 dieser Türen.

Zur Rauchabführung wird eine maschinelle Absauganlage simuliert. Die Absaugöffnungen sind im Abstand von 10 m auf der Mitte der Längsachse angeordnet. Jede Absaugöffnung hat eine Fläche von 4 m². Die Gesamtleistung der Absauganlage beträgt im 1. Fall ca. 75.000 m³/h, im 2. Fall 150.000 m³/h.

Es wird der Brand einer Büroeinrichtung unterstellt, der sich 5 Minuten lang ungehindert ausbreitet bevor die Sprinkleranlage aktiviert wird und die weitere Ausbreitung des Feuer beendet. Es wird konservativ angenommen, dass die Energiefreisetzungsrate / Abbrandrate bis zur manuellen Löschung des Feuers konstant bleibt. Die maximale Energiefreisetzungsrate beträgt 1,2 MW. Der Brandherd hat eine Fläche von 2 m² und befindet sich im Abstand von 5 m vom linken Ende des Brandraums auf der Längsachse.

Die Brandsimulation erfolgte mit dem Computational-Fluid-Dynamics (CFD) – Programm Fire Dynamics Simulator FDS (Version 2) von NIST, USA [20, 21].

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

Im 2. Fall herrscht über die gesamte Höhe ein 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.

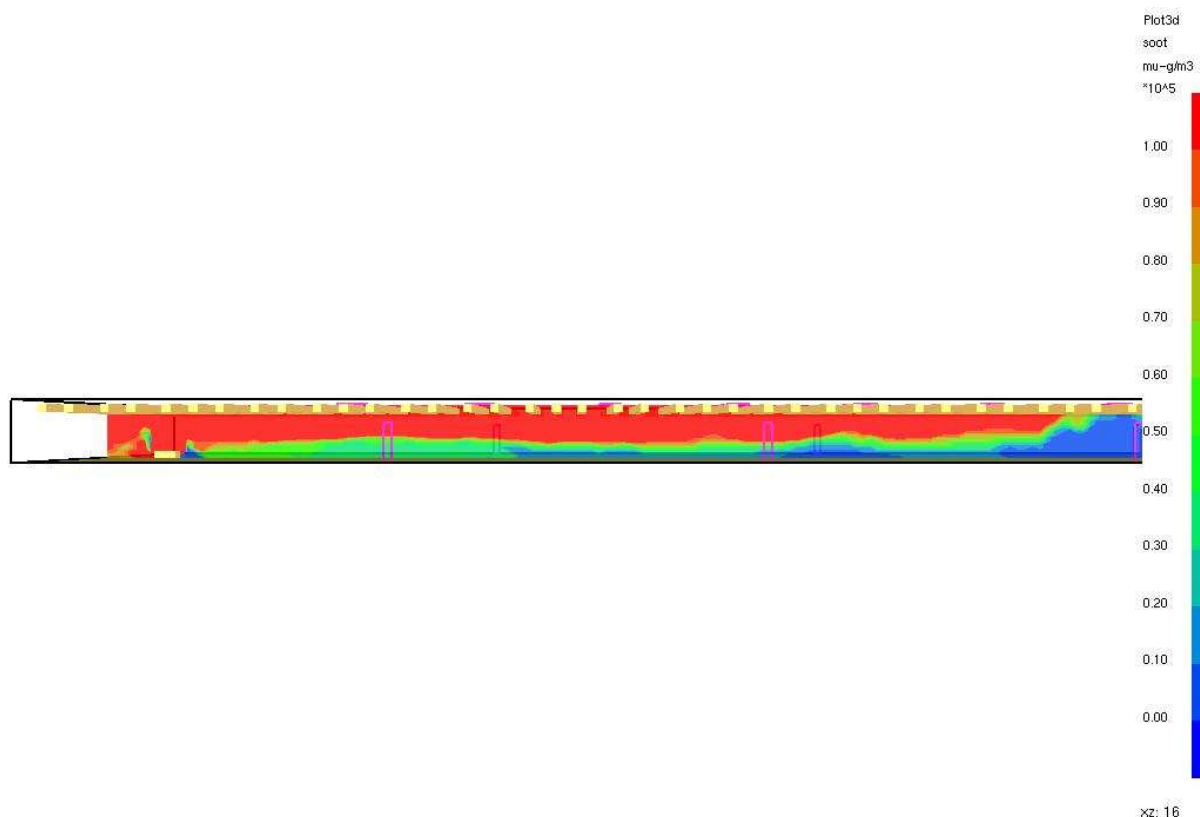


Bild 5.13 Rußkonzentration in der mittleren Längsebene nach 600 s, Leistung der maschinelle Abluft ca. 75.000 m³/h

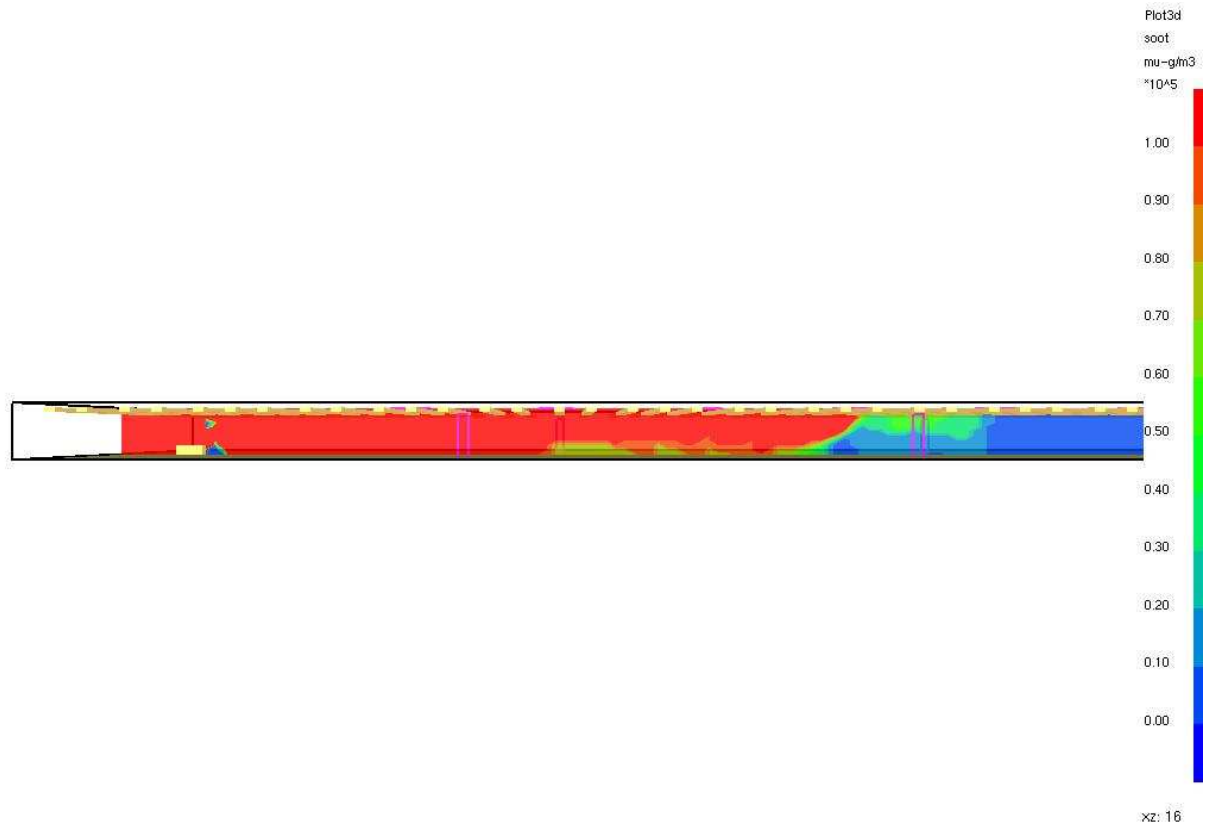
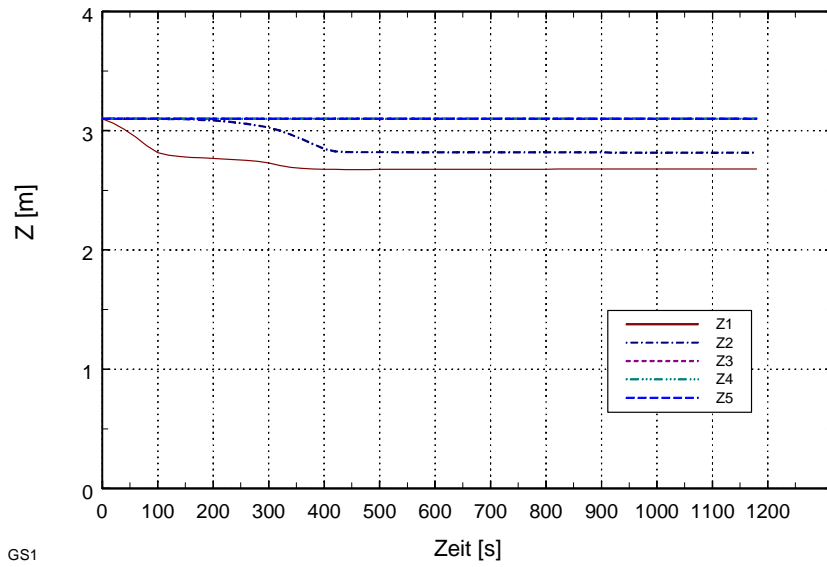


Bild 5.14 Rußkonzentration in der mittleren Längsebene nach 600 s, Leistung der maschinelle Abluft ca. 150.000 m³/h

Bild 5.15 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.

Das zweite Beispiel beinhaltet die Berechnung eines sehr hohen Luftraums mit einer relativ komplexen Unterteilung. Die Bilder 5.16 und 5.17 veranschaulichen die Berechnungsergebnisse für zwei unterschiedliche Auslegungen der Entrauchung mit dem oben genannten 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.



GS1

Bild 5.15 Rauchgasfreie Schicht nach Berechnung mit CFAST

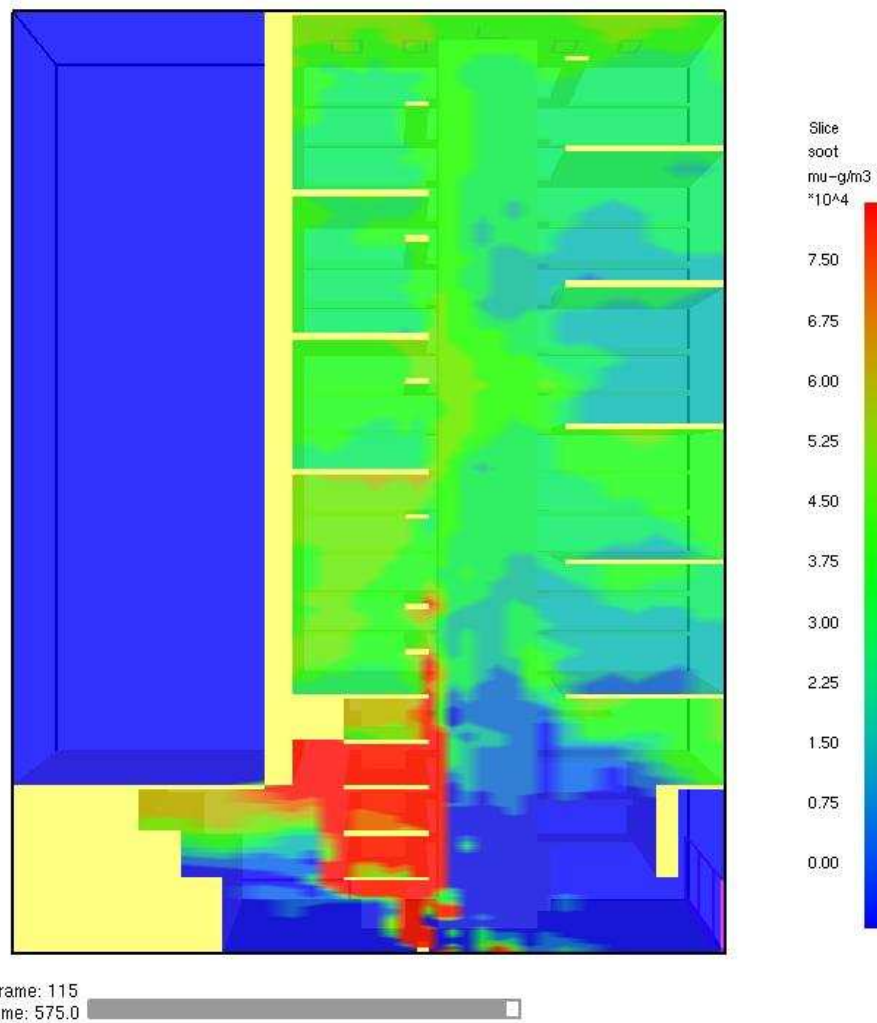


Bild 5.16 Zuluft über Eingangstüren (rechts Erdgeschoss), maschinelle Abluft über Dach 100 m³/s

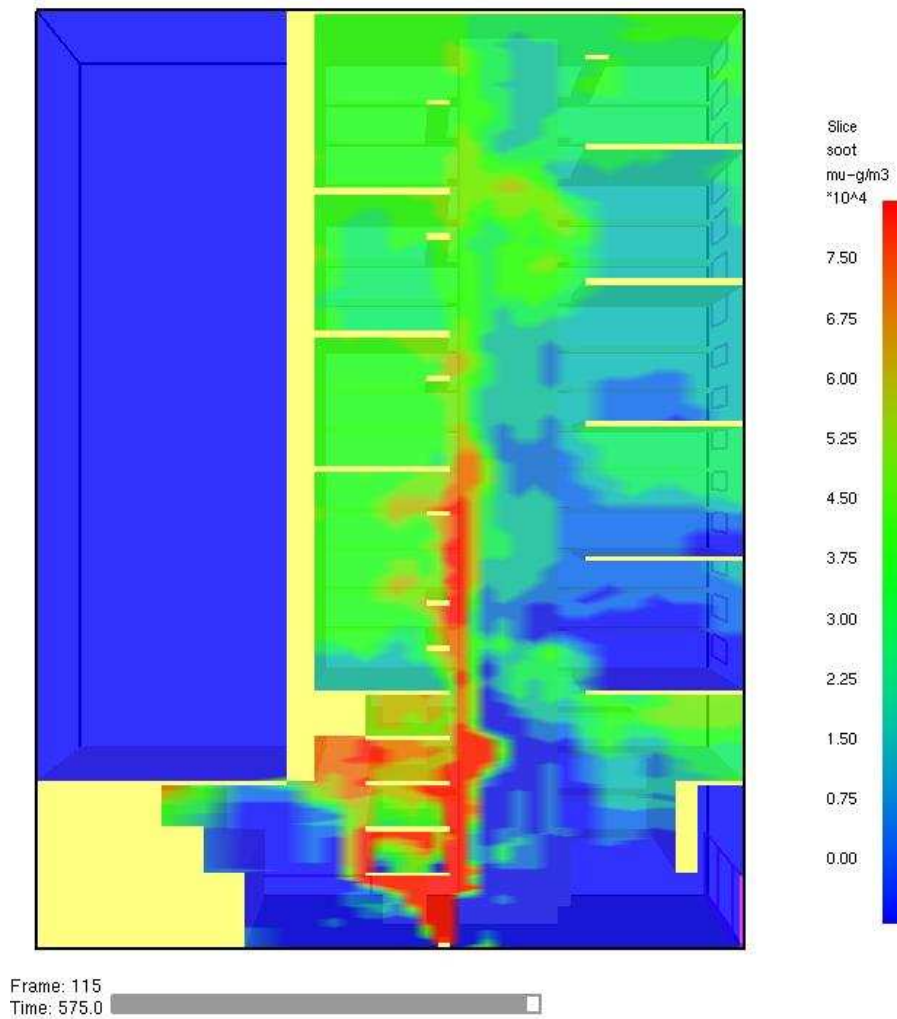


Bild 5.17 Zuluft über Eingangstüren (rechts Erdgeschoss), RWA in der Fassade (rechts)

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] beschrieben. Dabei handelt es sich im ersten Fall um die Rauchgasausbreitung über 3 Räume unterschiedlicher Größe.

5.6 Modellanwendung

5.6.1 Auswahl der Szenarien

Der Begriff Brandszenarium 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 Löschnmaßnahmen,
- 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 Charakter dieses Kapitels sprengen, daher erfolgt eine Beschränkung auf die oben genannten klassischen Aufgaben.

Bei der Auswahl des Modelltyps ist aber bereits hierfür 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 bei Ingenieursformeln und einfacheren Rechenverfahren sich 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 bestimmten 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 Isolinien-darstellungen) 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 Wärmebelastung 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 Ergebnis durchführen. Dies beinhaltet beispielsweise die Prüfung von Temperaturverteilungen auf unrealistische Werte oder den Vergleich der zeitlichen Entwicklung von Temperaturwerten, Rauchgasschichtentwicklung und Massenströmen mit denjenigen des Brandverlaufs. Da diese Werte mit der Wärmefreisetzungsrates korrelieren, müssen sie in gewissem Umfang der zeitlichen Entwicklung folgen (zumindest in der Anfangsphase).

Auf diese Weise lassen sich grobe Fehler, die aus Fehleingaben oder der Überschreitung von Anwendungsgrenzen resultieren, eliminieren.

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

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

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 Zu-

sammenstellung 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 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 der untersuchten Szenarien.
- Angabe des eingesetzten Simulationsmodells oder Rechenverfahrens, welches bei noch nicht validierten Modellen (siehe Anhang) Literaturangaben, bzw. Vergleichsrechnungen enthalten sollte.
- 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] prEN 12101-5: Rauch- und Wärmeschutzeinrichtungen: Funktionsanforderungen und Rechenverfahren für Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. CEN / TC191 / SC1 / WG5. Rohübersetzung NABau 00.36 35.00 Nr. 74 - 98, Berlin, 1998.
- [5.3] DRYSDALE, D.: An Introduction to Fire Dynamics, Wiley-Interscience, New York, 1992.
- [5.4] KARLSSON, B.; QUINTIERE, J. G.: Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, 2000.
- [5.5] COX, G. (ED.): Combustion Fundamentals of Fire, Academic Press, 1995.
- [5.6] SCHNEIDER, U.; KERSKEN, M.; MAX, U.: Bewertung von Brandlasten in größeren Räumen. Teil II. Theoretische Untersuchungen. Forschungsbericht der AGB, Institut für Bautechnik, Berlin, Oktober 1991.
- [5.7] BEYLER, C. L.: Fire Plumes and Ceiling Jets. Fire Safety Journal, 11, 1986.
- [5.8] EVANS, D.: Ceiling Jet Flows. The SFPE Handbook of Fire protection Engineering. Section 2. Chapter 4, pp. 2.32 - 2.39.

- [5.9] *EVANS, D.*: Calculating Actuation Time in Compartments. *Fire Safety Journal*, 9, 1985.
- [5.10] *ZUKOSKI, E. E.*: Properties of Fire Plumes. *Combustion Fundamentals of Fire*, Cox, G. (ed.), Academic Press, 1995.
- [5.11] *HOSSER, D.; DOBBERNACK, R.; SIEGFRIED, W.*: Rauchabzug in ausgedehnten Räumen ohne und mit Sprinkleranlage – am Beispiel des Industriebaus. *vfdB 4 / 97*.
- [5.12] *HOSSER, D.; SIEGFRIED, W.*: Vergleich von Simulationsmodellen für die brandschutztechnischen Fragestellungen. 5. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis. Schriftenreihe des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 103, 1993. ISBN 3-89288-079-4
- [5.13] *HESKESTAD, G.*: Engineering Relations for Fire Plumes. *Fire Safety Journal*, 1984, pp. 25 - 32.
- [5.14] *HESKESTAD, G.*: Fire Plumes. *The SFPE Handbook of Fire protection Engineering*. 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 Anwendungsgebiete und Grenzen. *VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (2)*, 1997.

- [5.23] SAVILONIS, B.: Survey and Evaluation of Existing Smoke Movement Models. Fire Safety Journal 13 (1988) 87.
- [5.24] BEARD, A.: Evaluation of Fire Models Part I. Fire Safety Journal 19 (1992) 295.
- [5.25] 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. 1. Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 2002. 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] *ZUKOWSKI, E. E.*: Properties of Fire Plumes in: Cox, G. (Ed.): Combustion Fundamental of Fires, Academic Press, London, 1995.
- [5.41] *DITTES, W.*: Methoden zur Darstellung der Luftströmungen in Fabrikhallen und Regeln für eine optimierte Lüftung. Dissertation Universität Stuttgart, 1996.
- [5.42] *BIEGERT, B.*: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Luftbewegung an wärmeabgebenden Körpern, Universität Stuttgart, IKE, Abt. Heizung, Lüftung, Klimatechnik, HLK 7D-205, 1990 (unveröffentlichte Studienarbeit).
- [5.43] *WILK, E.; KOTTHOFF, I.*: Modellversuche zur Lösung brand- und rauchschutztechnischer Probleme. vfdb-Zeitschrift 1 / 2001.
- [5.44] *STEINERT, C.*: Skalierung von Bränden – Teil 2: Physikalisches Modell. Brand- und Rauchversuche im originalen und verkleinerten Maßstab. vfdb-Zeitschrift 3 / 2002, S. 108 - 121.
- [5.45] *PLATE, E. J. (Ed.)*: Engineering Meteorology, Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [5.46] *GERHARDT, H. J.*: Physikalische Modellierung der Rauchableitung unter besonderer Beachtung des Windeinflusses. Braunschweiger Brandschutztag '01. 9. Fachseminar Brandschutz Forschung und Praxis. 1. und 2. Oktober 2001 in Braunschweig, Heft 158, S. 251 - 266.
- [5.47] WtG-Merkblatt. Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, 1996.
- [5.48] Grundsätze für Rauchversuche in Gebäuden. Technischer Bericht der vfdb. vfdb-Zeitschrift, Verlag W. Kohlhammer (Hrsg.), Heft 3 / 2001, S. 150 - 152.
- [5.49] 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 Freistrah- bzw. Plume-Theorien. VdS-Fachtagung. Rauchausbreitung und Rauchfreihaltung. Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (8), Juni 2003.

ANHANG ZU KAPITEL 5

Tabelle A5.1 Liste geeigneter, bzw. validierter Modelle

Modell	Modellart
First	Zonenmodell
MRFC	Mehrraum-Mehrzonenmodell
Harvard IV	Mehrraum-Mehrzonenmodell
CFAST	Mehrraum-Mehrzonenmodell
Figaro	Mehrraum-Mehrzonenmodell
FDS	Feldmodell
Kobra-3D	Feldmodell
Fluent	Feldmodell (es sind noch Vergleichsrechnungen notwendig)

Tabelle A5.2 Indizes

M	Modell
O	Original

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.

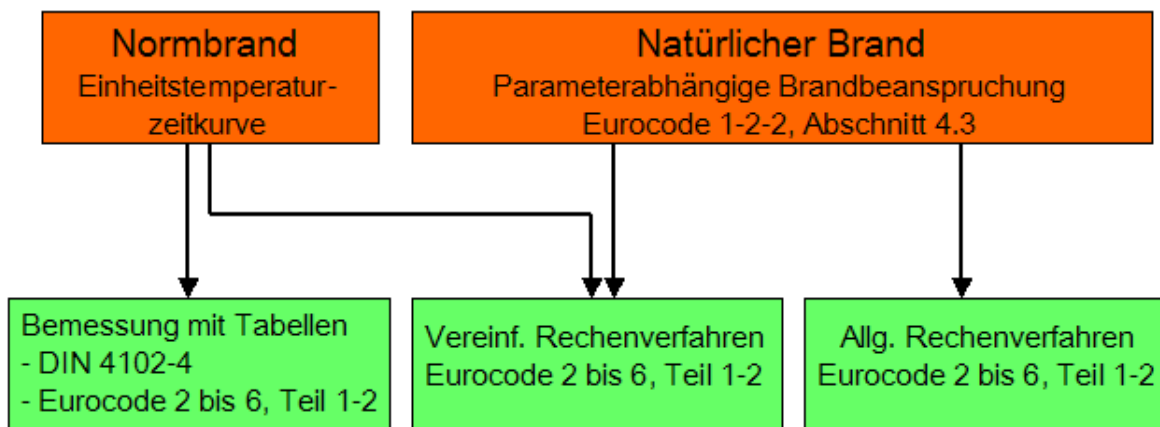


Bild 6.1 Zuordnung zwischen Brandbeanspruchung und Nachweisverfahren

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 Brandeinwirkung erfassen und dafür die temperaturabhängigen Veränderungen der Baustoffe und der Bauteilsteifigkeiten sowie die Wirkung der thermischen Ausdehnungen und Verformungen berücksichtigen. Für diese Nachweisform sind im Prinzip nur die allgemeinen Rechenverfahren (Abschnitt 6.5.5) geeignet. Für die Analyse von Teilen des

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

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 Teil 4 (03.94).

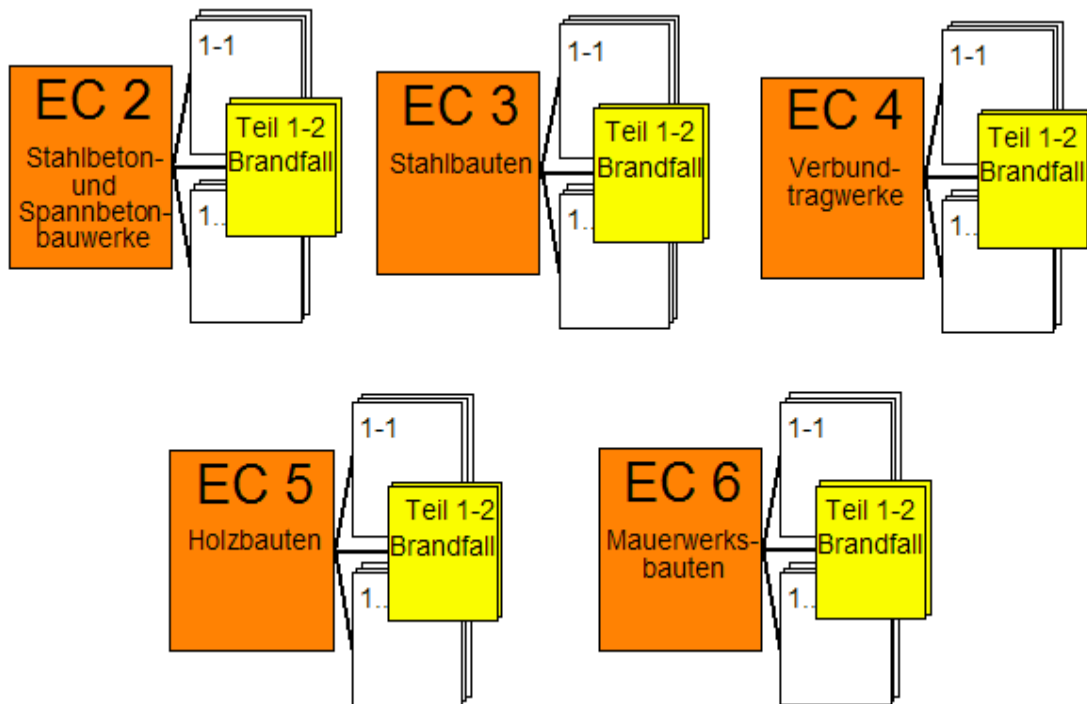


Bild 6.2 Gliederung der konstruktiven Eurocodes

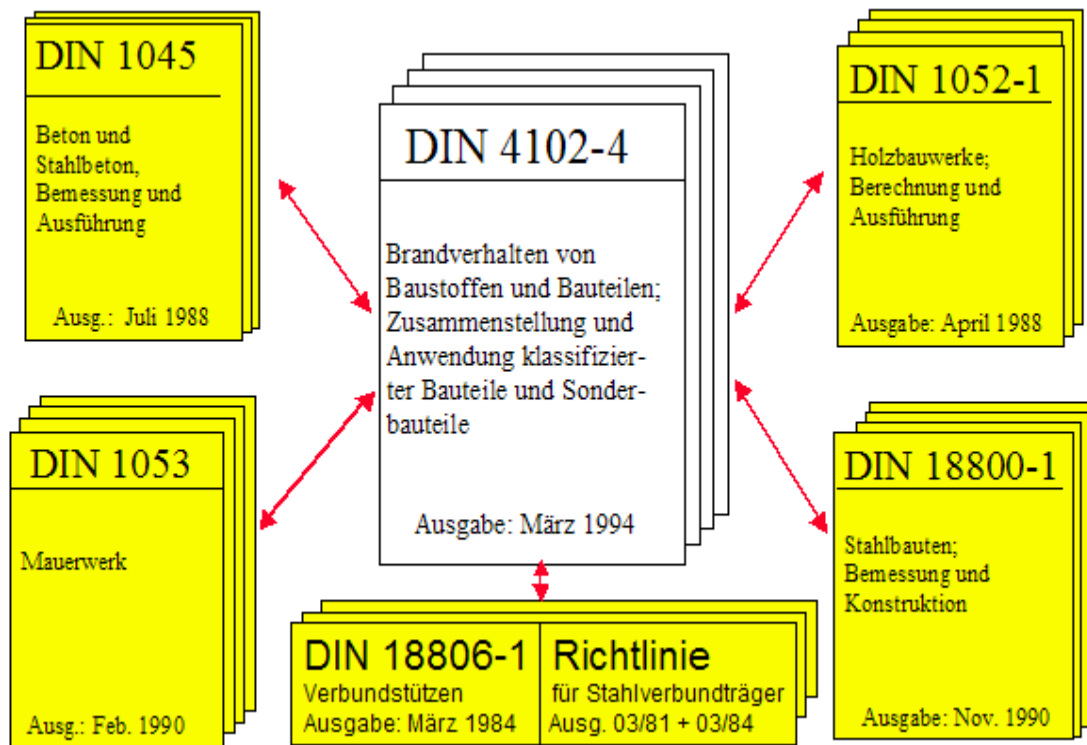


Bild 6.3 Zusammenhang zwischen Brandschutznorm DIN 4102-4 (03.94) und den für die Gebrauchslastfälle geltenden Konstruktionsnormen

Aus dem Vergleich der Bilder 6.2 und 6.3 wird die unterschiedliche Gliederung der deutschen und der europäischen Brandschutznorm deutlich: DIN 4102 Teil 4 enthält brandschutztechnische Bemessungsregeln für alle Konstruktionsbaustoffe während die Brandschutzteile des Eurocodes (Teil 1-2) immer nur die brandschutztechnischen Bemessungsregeln für Bauteile 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 Teil 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 Teil 22⁵ 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 Teil 4 (03.94) und Teil 22 durchgeführt wird.

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

⁵ DIN 4102-22 war zum Zeitpunkt der Drucklegung noch nicht bauaufsichtlich eingeführt

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

[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 langfristig vorgesehene Umstellung von deutschen auf europäische Normen werden im Folgenden aber auch die brandschutztechnischen Bemessungsregeln des Eurocodes 2 Teil 1-2 dargestellt.

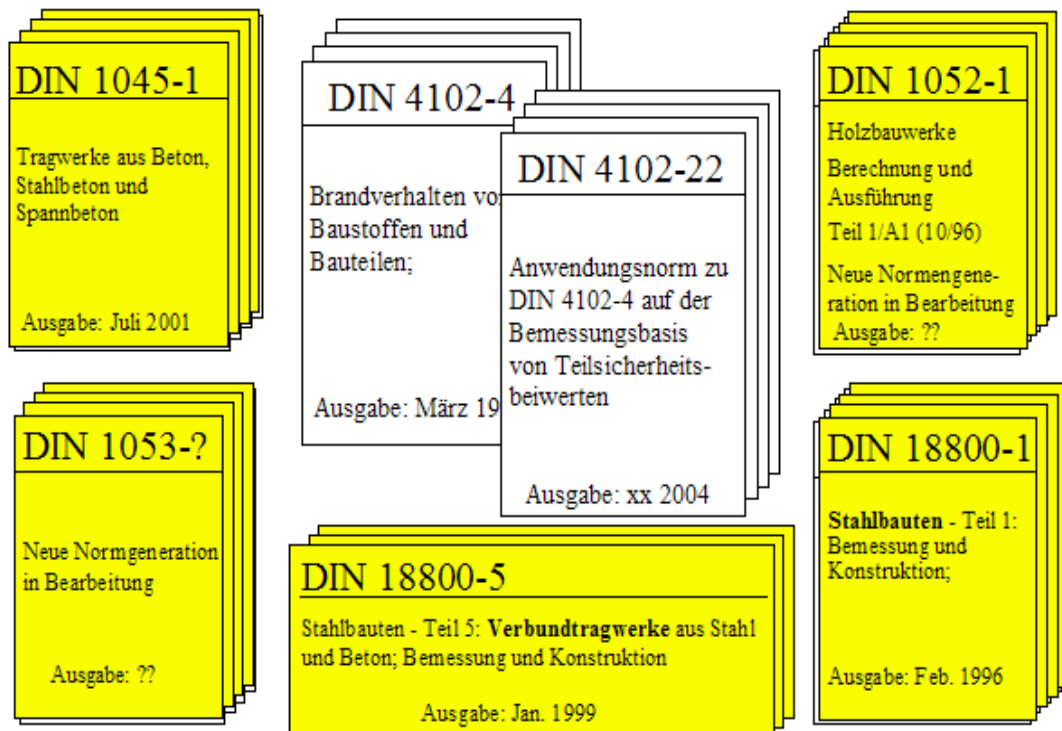


Bild 6.4 Zusammenhang zwischen Brandschutznorm DIN 4102 Teil 4 (03.94) und Teil 22 sowie den für die Gebrauchslastfälle geltenden neuen Konstruktionsnormen

Für Bauarten, für die aufgrund des komplexen Trag- und Verformungsverhaltens unter Brandeinwirkung 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.

6.3 Begriffe für Bauteil- und Tragwerksnachweise

Die in Klammern angegebenen Abschnittsnummern beziehen sich auf DIN 4102 Teil 4, unter „EC“ werden die Definitionen aus den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 - 6 gegeben.

Feuerwiderstandsdauer Dauer in Minuten, während der ein Bauteil unter praxisgerechten Randbedingungen und unter einer bestimmten Brandbeanspruchung die Anforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit und / oder Raumabschluss erfüllt.

EC: Definition wie oben

Feuerwiderstandsklasse	<p>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 ..).</p> <p>EC: Klassifizierung der Bauteile nach dem europäischen Grundlegendokument Brandschutz [6.30]:</p> <ul style="list-style-type: none"> R – Feuerwiderstandsdauer, während der die Tragfähigkeit erhalten bleibt RE – Feuerwiderstandsdauer, während der die Tragfähigkeit und der Raumabschluss erhalten bleiben REI – Feuerwiderstandsdauer, während der die Tragfähigkeit, der Raumabschluss und die Wärmedämmung erhalten bleiben REI-M – wie REI, zusätzlich widerstandsfähig gegen mechanische Beanspruchung <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 noch Kennzeichnungen für W (Strahlungsdurchlässigkeit), C (Selbstschließen von Feuerschutzabschlüssen) und S (Leckrate für Rauchdurchtritt).</p>
Einheitstemperaturzeitkurve (ETK)	<p>Normbrandkurve nach DIN 4102-2 (bzw. DIN EN 1363-1) für Bauteilprüfungen.</p> <p>EC: Nominelle Temperaturzeitkurve nach EC 1 Teil 2-2</p>
Kritische Temperatur	<p>Die kritische Temperatur T_{crit} des Bewehrungs- oder Baustahls ist die Temperatur, bei der die Bruch- bzw. Streckgrenze des Stahls auf die im Bauteil vorhandene Stahlspannung absinkt (3.1.3.1 und 6.1.1.1).</p> <p>EC: Temperatur, bei der unter einer gegebenen Belastung – bei Stahlbauteilen bei gleichförmiger Temperaturverteilung im Querschnitt – Versagen der Bewehrung bzw. des Stahlbauteils zu erwarten ist.</p>
Achsabstand	<p>Der Achsabstand u der Bewehrung ist der Abstand zwischen der Längsachse der tragenden Bewehrungsstäbe (Längsstäbe) oder Spannglieder und der beflamten Betonoberfläche (3.1.4.1).</p> <p>EC: Achsabstand a, Definition wie oben</p>
Mittlerer Achsabstand	<p>Bei einlagig bewehrten Balken mit unterschiedlichen Stabdurchmessern und mehrlagig bewehrten Balken muss der mittlere</p>

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

$$\text{Achsabstand } u_m = \frac{A_1 \cdot u_1 + A_2 \cdot u_2 + \dots + A_n \cdot u_n}{\sum A_{1,\dots,n}} \quad \text{eingehalten}$$

werden (3.2.4.2/3).

EC: mittlerer Achsabstand a_m , Definition wie oben

Profilmfaktor

U/A- Wert zur Berechnung der Erwärmung von Stahlbauteilen (6.1.2), Umfang U im Verhältnis zur Querschnittsfläche A [1/m] in Abhängigkeit der Beflammung (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

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 $\varnothing \leq 8$ mm, Abstand ≤ 50 mm erforderlich (3.1.5.2).

6.4 Nachweise nach DIN 4102 Teil 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 Teil 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 Teil 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 Teil 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 vorhandene 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 Mindestbekleidungs-dicken 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 dazwischenlie-

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

gende 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. 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 einzuordnen, wenn die durch Konsolen oder Stützen gebildeten Auflagerungen sowie die Aussteifungskonstruktion ebenfalls eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten oder größer haben.

Durch die Tabellenwerten 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.

6.5 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) wird neben dem Brandschutzteil des baustoffbezogenen Eurocodes zusätzlich der baustoffübergreifende Brandschutzteil des Eurocodes 1 mit Angaben zu Lastannahmen und Brandeinwirkungen benötigt. Seit Mitte 1997 liegen die Brandschutzteile der Eurocodes 1 bis 6 (EC 1 bis EC 6), seit Mitte 1998 auch der Brandschutzteil des Eurocodes 9 (EC 9) als deutsche Vornorm (DIN V) vor:

EC 1-2-2	DIN V ENV 1991-2-2 Grundlagen und Einwirkungen [6.2]
EC 2-1-2	DIN V ENV 1992-1-2 Tragwerksbemessung für Stahlbeton- und Spannbetontragwerke [6.3]
EC 3-1-2	DIN V ENV 1993-1-2 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten [6.4]
EC 4-1-2	DIN V ENV 1994-1-2 Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton [6.5]
EC 5-1-2	DIN V ENV 1995-1-2 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten [6.6]

EC 6-1-2	DIN V ENV 1996-1-2 Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten [6.7]
EC 9-1-2	DIN V ENV 1999-1-2 Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen [6.8] ⁶

Zum Zeitpunkt der Drucklegung des Leitfadens befanden sich die europäischen Vornormen (ENV-Fassungen) in unterschiedlichen Bearbeitungsstadien hinsichtlich der Umwandlung in sog. prEN-Fassungen (Entwurf europäischer Norm), die dann längerfristig die Grundlage für die harmonisierten europäischen Normen EN darstellen. Auf Grund der noch nicht abgeschlossenen Arbeiten an den Brandschutzteilen der Eurocodes und der relativ langen Dauer bis zu ihrer endgültigen bauaufsichtlichen Einführung – Anwendung in ca. 3 Jahren, vollständige Umstellung auf EN-Normen in ca. 6 Jahren – wird in den folgenden Abschnitten die brandschutztechnische Bemessung auf Grundlage der europäischen Vornorm DIN V ENV gezeigt.

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. Seine Anwendung erfolgt in Verbindung mit dem Nationalen Anwendungsdokument [6.12].

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. Hochleistungsbeton mit einer Zylinderdruckfestigkeit größer 50 N/mm^2 , muss deren brandschutztechnische Eignung durch Brandversuche nachgewiesen werden.

Auf die brandschutztechnische Bemessung nach Eurocode 6 Teil 1-2 wird im Folgenden nicht näher eingegangen, weil im Normenteil keine tabellarische Daten, keine vereinfachten und keine allgemeinen Rechenverfahren vorhanden sind. Bei „Kaltbemessung“ nach Eurocode 6 Teil 1-1 muss der Brandschutznachweis mit Tabellen aus dem Nationalen Anwendungsdokument (s. Abschnitt 6.5.2) erfolgen, in denen die Mindestwanddicken für Mauerwerk aus geregelten Bauprodukten für bestimmte Feuerwiderstandsklassen angegeben werden [6.13].

6.5.2 Nationale Anwendungsdokumente (NAD)

Bei Anwendung der europäischen Vornormen DIN V ENV müssen die sogenannten „Nationalen Anwendungsdokumente“ (NAD) [6.12] beachtet werden. In den NAD wird die Anpassung an das nationale Sicherheitsniveau geregelt und es werden Festlegungen für die sog. „boxed values“ getroffen. Als „boxed values“ werden die in den Vornormen durch Einrahmung oder durch eckige Klammern gekennzeichneten Zahlen bezeichnet. Sie sind nur als Anhalt zu verstehen, vor ihrer Übernahme in eine brandschutztechnische Bemessung muss im NAD ihre nationale Festlegung geprüft werden.

⁶ Auf die brandschutztechnische Bemessung von Aluminiumkonstruktionen wird im Leitfaden nicht eingegangen, da das grundsätzliche Vorgehen sehr ähnlich ist wie für Stahlbauteile.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

Zusätzlich wurden in den NAD's folgende Vorgaben für die nationale Anwendung der Brandschutzteile der Eurocodes gemacht:

Die Nachweise mittels tabellarischer Daten unter Vorgabe einer Brandbeanspruchung nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) werden uneingeschränkt zugelassen.

Für die Nachweise mit vereinfachten Rechenverfahren bestehen keine Einschränkung, solange ein Brand nach ETK zu Grunde gelegt wird und die „Kaltbemessung“ nach Eurocode erfolgt. Abweichende Temperaturzeitkurven bedürfen der Zustimmung der Bauaufsicht.

Allgemeine Rechenverfahren dürfen nur mit Zustimmung der Bauaufsicht von erfahrenen Fachleuten angewendet werden. Die Nachweise sind von einem für derartige Brandschutznachweise besonders qualifizierten Prüfsachverständigen zu prüfen.

Alle Regelungen in den Eurocodes und deren informativen Anhängen, die eine Abweichung von Brandschutzanforderungen der Bauordnung oder zusätzlich heranzuziehender Sonderverordnungen zum Ziel haben, sind vorerst nicht zur Anwendung zugelassen. Ausnahmen können im Einzelfall von der Bauaufsichtsbehörde gestattet werden.

6.5.3 Tabellarische Daten

Die Nachweisverfahren mittels tabellarischer Daten beschränken sich in der Regel darauf, die Querschnittsabmessungen oder Bekleidungsstärken eines Bauteils mit Werten zu vergleichen, die nach Brandversuchsergebnissen zum Erreichen der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer erforderlich sind. Sie entsprechen damit weitestgehend den Bemessungstabellen der DIN 4102 Teil 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 [6.14], der Brandschutzteil des Eurocodes 3 enthält nur rechnerische Nachweisverfahren.

Die Bemessungstabellen sind sehr ähnlich aufgebaut wie die entsprechenden Tabellen in DIN 4102 Teil 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- und -träger 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 Eurocode 4 Teil 1-2 enthalten die normativen Anhänge F und G Traglastdiagramme für Verbundstützen mit teilweise einbetoniertem Querschnitt und für Verbundstützen mit betongefülltem Querschnitt. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse von Berechnungen mit allge-

meinen 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 2-2 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 im Eurocode 2 Teil 1-2 enthaltenen vereinfachten Rechenverfahren 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. 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 [6.15] geführt werden.

Der reduzierte Bauteilquerschnitt und die temperaturabhängige Abminderung der Festigkeitsbeiwerte können für rechteckförmige oder aus Rechtecken zusammengesetzte Querschnittsformen mit Hilfe der im Eurocode 2-1-2, Abschnitt 4.3.3 angegebenen Gleichungen oder mit Hilfe von Diagrammen aus dem Eurocode 2-1-2, Anhang B ermittelt werden.

Ein weiteres vereinfachtes Rechenverfahren zur Berechnung der „heißen“ Tragfähigkeit von Einfeldträgern und durchlaufenden Balken sowie von Decken ist im informativen Anhang C des Eurocodes 2-1-2 angegeben. Das Näherungsverfahren ist besonders für Bauteile geeignet, bei denen der vorhandene Achsabstand der Bewehrung kleiner ist als der Wert, der in den Tabellen des Eurocodes 2-1-2 als Mindestwert gefordert wird. Voraussetzung für die Anwendung des vereinfachten Nachweisverfahrens ist, dass die Querschnittsabmessungen ansonsten mindestens den Werten der Tabellen des Eurocodes 2-1-2 entsprechen.

Im Eurocode 3 Teil 1-2 werden für vereinfachte rechnerische Nachweise von Bauteilen Näherungsverfahren aus [6.16] bereitgestellt. Als Einwirkung $E_{fi,d}$ wird die Stahltemperatur im Bauteilquerschnitt angesehen. Zur Berechnung der Stahltemperaturen von unbekleideten und bekleideten Querschnitten im Gebäudeinneren werden im Eurocode 3-1-2 Gleichungen angegeben, mit denen die Temperaturerhöhung $\Delta\Theta_{a,t}$ im Zeitintervall Δt ermittelt wird. In [6.31] sind die Gleichungen bis 90 Minuten Branddauer ausgewertet und die Temperaturen in tabellarischer Form dargestellt. Die Stahltemperaturen in Bauteilen außerhalb des Gebäudes können nach Eurocode 3-1-2, Anhang C ermittelt werden.

Ohne weiteren Nachweis ist Gl. (6.17) bei allen Bauteilarten erfüllt, wenn die Stahltemperatur Θ_a zum Zeitpunkt t in keinem Bauteilquerschnitt größer als 350 °C ist oder in Abhängigkeit der Beanspruchung, der Querschnittsklasse und der Bauteilschlankheit Werte zwischen $\Theta_a = 550\text{ °C}$ und $\Theta_a = 510\text{ °C}$ nicht überschreitet.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

Der Bauteilwiderstand $R_{fi,d,t}$ kann bestimmt werden:

- a) bei Annahme einer gleichförmigen Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt, indem die kritische Stahltemperatur $\Theta_{a,cr}$ nach Gl. (6.1) ermittelt wird:

$$\Theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 \quad (6.1)$$

mit

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (6.2)$$

ϵ_{res} Ausnutzungsfaktor für Bauteile der Querschnittsklasse 1, 2 oder 3 nach Eurocode 3 Teil 1-1 sowie für Zugglieder

$R_{fi,d,0}$ Bauteilwiderstand zum Zeitpunkt $t = 0$ min

oder

- b) indem der Bauteilwiderstand unter Normaltemperatur nach Eurocode 3 Teil 1-1 ermittelt und aufgrund der zum Zeitpunkt t vorhandenen Temperaturbeanspruchung im Stahl modifiziert wird, wobei die temperaturabhängigen Baustoffeigenschaften zu berücksichtigen sind. In diesem Fall werden im Eurocode 3-1-2 Rechenanweisungen für die Berechnung des Bauteilwiderstandes $R_{fi,d,t}$ unter Berücksichtigung der zum Zeitpunkt t vorhandenen Temperaturbeanspruchung im Stahl gegeben. Dabei wird der Widerstand als M_{Rd} , N_{Rd} oder V_{Rd} entsprechend der Einwirkung in Form von Biegemoment, Normalkraft oder Schubkraft bezeichnet.

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

Das Rechenverfahren im Eurocode 4-1-2 zum Nachweis der Feuerwiderstandsklasse von ungeschützten Verbunddecken, speziell Stahlprofilblechdecken, stammt aus [6.16]. Es kann für statisch bestimmt gelagerte und als Durchlaufkonstruktion ausgeführte Verbunddecken angewendet werden. Mit dem vereinfachten Verfahren wird die Verbunddecke hinsichtlich ausreichender thermischer Isolierung und Tragfähigkeit bemessen. Bei der Bemessung wird der Feuerwiderstand durch die Wahl der Deckendicke und die Menge der Zulagebewehrung, die im Brandfall Lastanteile der temperaturbedingt entfestigten Stahlprofilbleche übernimmt, gewährleistet. Bei dem vereinfachten Verfahren wird die Tragwirkung des Stahlprofilbleches im Brandfall vollständig vernachlässigt. Ohne weiteren Nachweis gilt das Tragverhalten als gesichert, wenn die Temperatur des Stahlprofilblechs 350 °C nicht übersteigt.

Das vereinfachte Rechenverfahren kann auch für statisch bestimmt gelagerte Verbundträger ohne Kammerbeton angewendet werden. Die Erwärmung der Stahlträger wird mit den Gleichungen aus dem Eurocode 3-1-2 für unbekleidete und bekleidete Träger ermittelt. Die Er-

wärmung des Betongurts wird aus den Diagrammen des Eurocodes 4-1-2 für Temperaturverteilungen in einer ungeschützten Verbunddecke entnommen.

Die Tragfähigkeit von Verbundträgern ohne Kammerbeton, bei denen das Stahlprofil nicht höher als 500 mm und die Dicke des Betongurts 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 im normativen Anhang D des Eurocodes 4-1-2 detaillierte Angaben gemacht.

Das vereinfachte Nachweisverfahren für Verbundträger mit Kammerbeton basiert auf dem Traglastverfahren [6.17]. Mit dem Verfahren können Klassifizierungen von R 30 bis R 180 für statisch bestimmt gelagerte und durchlaufende Verbundträger vorgenommen werden. Der Temperatureinfluss auf das Baustoffverhalten kann durch Berücksichtigung reduzierter Querschnittsabmessungen oder durch Reduktion der mechanischen Festigkeitseigenschaften erfolgen. Dem Anhang E von Eurocode 4-1-2 können – nach Feuerwiderstandsdauern geordnet – die Reduktionsfaktoren für die Querschnittsabmessungen bzw. den Festigkeitseigenschaften entnommen werden.

Im Eurocode 4-1-2 ist auch ein vereinfachtes Rechenverfahren für Verbundstützen in aussteiften Rahmen enthalten. Bei diesem Verfahren wird der Stabilitätsverlust der Verbundstütze infolge der temperaturabhängigen Steifigkeitsabnahme berücksichtigt [6.18]. Dazu wird die Veränderung des E-Moduls durch Vorgabe von Reduktionsfaktoren für festgelegte Querschnittsbereiche erfasst. Der Schlankheitseinfluss wird durch spezielle, für den Brandbeanspruchungszustand gültige Knickspannungskurven berücksichtigt [6.19].

Im Eurocode 5 Teil 1-2 wird das Tragverhalten von Holzbauteilen bei Brandbeanspruchung – neben der Temperaturentwicklung im Querschnitt – vor allem durch den Abbrand des äußeren, dem Feuer direkt ausgesetzten Querschnittsbereichs beeinflusst. Für die brandschutztechnische Bemessung tragender Holzbauteile werden zwei vereinfachte Rechenverfahren angeboten, die beide von der Abbrandrate v ausgehen und damit eine bestimmte Abbrandtiefe d nach t Minuten Brandbeanspruchung berechnen. Die Abbrandrate wird im Eurocode 5-1-2, Tabelle 3.1, in Abhängigkeit von der Holzsorte (Vollholz, Brettschichtholz, u. a.) vorgegeben.

Beim Δd -Verfahren wird die Abbrandtiefe d um einen Betrag Δd erhöht. Der Tragfähigkeitsnachweis für den verbleibenden Restquerschnitt darf dann mit den Festigkeits- und Verformungseigenschaften bei Normaltemperatur durchgeführt werden. Der Betrag Δd wird im Eurocode 5-1-2, Tabelle 4.1, als zeitabhängige Größe definiert. Dabei ist zusätzlich zu berücksichtigen, ob die beflammte Oberfläche geschützt oder ungeschützt dem Feuer ausgesetzt wird.

Das T_m -Verfahren kann für Holzbauteile unter Normbrandbedingungen angewendet werden, die unter Biege-, Druck- oder Zugbeanspruchung stehen. Im normativen Anhang A zum Eurocode 5-1-2 sind Angaben zum Rechenverfahren enthalten. Für die temperaturabhängige Reduzierung der Biege-, Druck- und Zugfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls werden Re-

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

chenfunktionen in Abhängigkeit vom Verhältnis des beflamnten Umfangs des Restquerschnitts zur Fläche des Restquerschnitts angegeben.

Im normativen Anhang C zum Eurocode 5-1-2 sind für raumabschließende Konstruktionen Näherungsverfahren zum Nachweis der Temperaturerhöhung $\Delta T \leq 140 \text{ K}$ und $\Delta T \leq 180 \text{ K}$ auf der dem Feuer abgewandten Seite angegeben.

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 Gesamttragwerken mit beliebiger Querschnittsart und -form und bei voller oder lokaler Temperaturbeanspruchung angewendet werden. Für den Nachweis werden Rechengrundlagen zur Ermittlung der Temperatur- und Lasteinwirkungen benötigt. Sie befinden sich im Eurocode 1 Teil 2-2. 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 wird in der Regel getrennt in eine thermische und eine mechanische Analyse.

- 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 2-2, Abschnitt 4.2 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 wird das Trag- und teilweise auch das Verformungsverhalten der brandbeanspruchten Bauteile berechnet. Dabei müssen auf der Einwirkungsseite die Einflüsse aus der Belastung, behinderten thermischen Verformungen (Zwangkräfte und -momente) sowie gegebenenfalls aus nichtlinearen geometrischen Einflüssen berücksichtigt werden. Auf Seiten des Bauteil-

widerstandes 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.

Die Anwendung der allgemeinen Rechenverfahren bedarf der Genehmigung durch die Bauaufsichtsbehörde. Die Nachweise müssen von einem Prüfenieur mit einschlägigen Erfahrungen geprüft werden (s. Abschnitt 6.5.2).

6.5.5.2 Thermische Analyse

6.5.5.2.1 Thermische Einwirkungen

Im Eurocode 1991-2-2, Abschnitt 4.2 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. (6.3), die Hydrokarbon-Brandkurve nach Gl. (6.4) oder die externe Brandkurve nach Gl. (6.5) angenommen werden:

$$\Theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.3)$$

$$\Theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.4)$$

$$\Theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.5)$$

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 externe Brandkurve darf zum Nachweis des Raumabschlusses bei nichttragenden Außenwänden und aufgesetzten Brüstungen als Brandbeanspruchung von außen angesetzt werden; sie entspricht der abgeminderten ETK nach DIN 4102 Teil 3 [6.1].

Neben den standardisierten Temperaturzeitkurven werden im Eurocode 1-2-2, Abschnitt 4.3 in Verbindung mit den informativen Anhängen A, B und D parameterabhängige Brandbeanspruchungen vorgesehen, bei denen die Berechnung der Heißgastemperaturen auf der Grundlage von physikalischen Parametern durchgeführt wird. Im NAD zum Eurocode 1-2-2 sind parameterabhängige Brandbeanspruchungen nach Eurocode 1-2-2, Abschnitt 4.3 in Verbindung mit den informativen Anhängen A, B und D grundsätzlich nicht für die Anwendung freigegeben.

Die thermischen Einwirkungen auf Bauteile werden im Eurocode 1-2-2, Abschnitt 4.1 vereinfacht in Abhängigkeit von der Heißgastemperatur in der Bauteilumgebung Θ_g als Wärmestromdichte h'_{net} mit einem radiativen $h'_{\text{net,r}}$ (Gl. (6.6)) und einem konvektiven Anteil $h'_{\text{net,c}}$ (Gl. (6.7)) berechnet.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

$$h'_{\text{net},r} = \Phi \cdot \varepsilon_{\text{res}} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.6)$$

mit

Φ	Faktor zur Berücksichtigung von Abschattungen [-]
ε_{res}	resultierender Emissionsgrad [-] $= \varepsilon_t \cdot \varepsilon_m$
ε_t	Emissionsgrad des Brandraums [-] (s. Tab. 6.1)
ε_m	Emissionsgrad der Bauteiloberfläche [-] (s. Tab. 6.1)
Θ_r	Strahlungstemperatur der Umgebung [°C]
Θ_m	Oberflächentemperatur des Bauteils [°C]
$5,67 \cdot 10^{-8}$	Stefan-Boltzmann-Konstante [W/m ² K ⁴].

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

mit

α_c	Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion [W/m ² K]
Θ_g	Heißgastemperatur in der Umgebung des Bauteils [°C].

In der Regel darf vereinfachend der Faktor $\Phi = 1,0$ und die Strahlungstemperatur Θ_r gleich der Heißgastemperatur Θ_g gesetzt werden.

Tabelle 6.1 Emissionsgrad des Brandraums ε_t und der Bauteiloberfläche ε_m

Brandschutzteil der Eurocodes und NAD	Emissionsgrad [-]		
	Brandraum ε_t	Bauteiloberfläche ε_m	resultierend ε_{res}
1, 2, 5 und 6	0,8	0,9	0,72
3	0,8	0,625 ¹⁾	0,50
4	0,8	0,7 ²⁾	0,56

¹⁾ ungeschützte Stahloberfläche

²⁾ Stahl- und Betonoberfläche

Weitere Vereinfachungen dürfen nach Eurocode 1-2-2 bei Anwendung der standardisierten Temperaturzeitkurven getroffen werden:

- für den Emissionsgrad des Brandraums ε_t und der Bauteiloberfläche ε_m dürfen die in Tabelle 6.1 aus den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6 in Verbindung mit dem jeweiligen NAD zusammengestellten Werte verwendet werden.

- der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion darf zu $\alpha_c = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf der brandbeanspruchten Bauteiloberfläche und $\alpha_c = 9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf der brandabgekehrten Bauteiloberfläche gesetzt werden
- die Anteile aus konvektiver und radiativer Wärmestromdichte dürfen nach Gl. (6.8) addiert werden

$$h'_{\text{net,d}} = \gamma_{n,c} \cdot h'_{\text{net,c}} + \gamma_{n,r} \cdot h'_{\text{net,r}} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (6.8)$$

mit

$\gamma_{n,c}$ Faktor zur Berücksichtigung nationaler Brandversuche

$\gamma_{n,r}$ wie für $\gamma_{n,c}$

im NAD zum Eurocode 1-2-2 wird $\gamma_{n,c} = 1,0$ und $\gamma_{n,r} = 1,0$ empfohlen

Im Eurocode 1-2-2 werden keine Angaben über die Gültigkeit der Vereinfachungen gemacht, wenn anstelle der standardisierten Temperaturzeitkurven mit einer Brandbeanspruchung nach Kapitel 5 des Leitfadens, einem sog. natürlichen Brandverlauf gerechnet wird. In [6.20] wurden Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion α_c im natürlichen Brand Werte zwischen 15 und 25 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ und der Emissionsgrad 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. Die Trennung der Wärmebeaufschlagung in eine radiative und eine konvektive Komponente wird zusätzlich durch die inhomogene Rauch-, Temperatur- und Flammenverteilung erschwert. In [6.20] werden deshalb nur ungefähre Größenordnungen für den Wärmeübergangskoeffizient und den Emissionsgrad im natürlichen Brand angeben.

Für die Berechnung der thermischen Einwirkung infolge natürlicher Brände wird deshalb vorgeschlagen, die Vereinfachungen des Eurocodes 1-2-2 für standardisierten Temperaturzeitkurven als grobe Näherung zu übernehmen.

6.5.5.2.2 Temperaturverteilung in Bauteilen

Grundlage für die Berechnung der Temperaturverteilung in Bauteilen ist die Differentialgleichung von Fourier (Gl. (6.9)) zur Beschreibung der instationären Wärmeleitung in Festkörpern. Dabei wird vorausgesetzt, dass keine Wärmequellen oder -senken im Körperinneren vorhanden sind.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \quad (6.9)$$

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

mit

T	Temperatur [K]
t	Zeit [s]
a	$= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ Temperaturleitzahl [m ² /s]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
ρ	Rohdichte [kg/m ³]
c_p	spezifische Wärme [J/(kgK)]
x, y, z	Raumkoordinaten [m]

Eine analytische Lösung für Gl. (6.9) 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 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 Differenzen mit Integrationsverfahren über die Zeitschritte eingesetzt. Für baupraktische Fälle werden dabei folgende Vereinfachungen getroffen:

- Die Temperatursausbreitung in Bauteillängsrichtung wird vernachlässigt. In stabförmigen Bauteilen wird die Temperatursausbreitung nur in der Querschnittsfläche (zweidimensional) und in flächigen Bauteilen nur über die Querschnittsdicke (eindimensional) berechnet.
- Wasserdampfbewegungen werden nicht erfasst.
- Beim Beton wird der Energieverbrauch für das Verdampfen von Wasser und sonstige energieverzehrende Vorgänge durch die geeignete Wahl des Rechenwerts für die spezifische Wärmekapazität des Betons im Temperaturbereich 100 - 200 °C berücksichtigt.
- Beton wird bezüglich seiner thermischen Materialeigenschaften als homogener Baustoff angesehen. Das heterogene Gefüge, Kapillarporen und Risse werden pauschal in den thermischen Materialgesetzen erfasst.

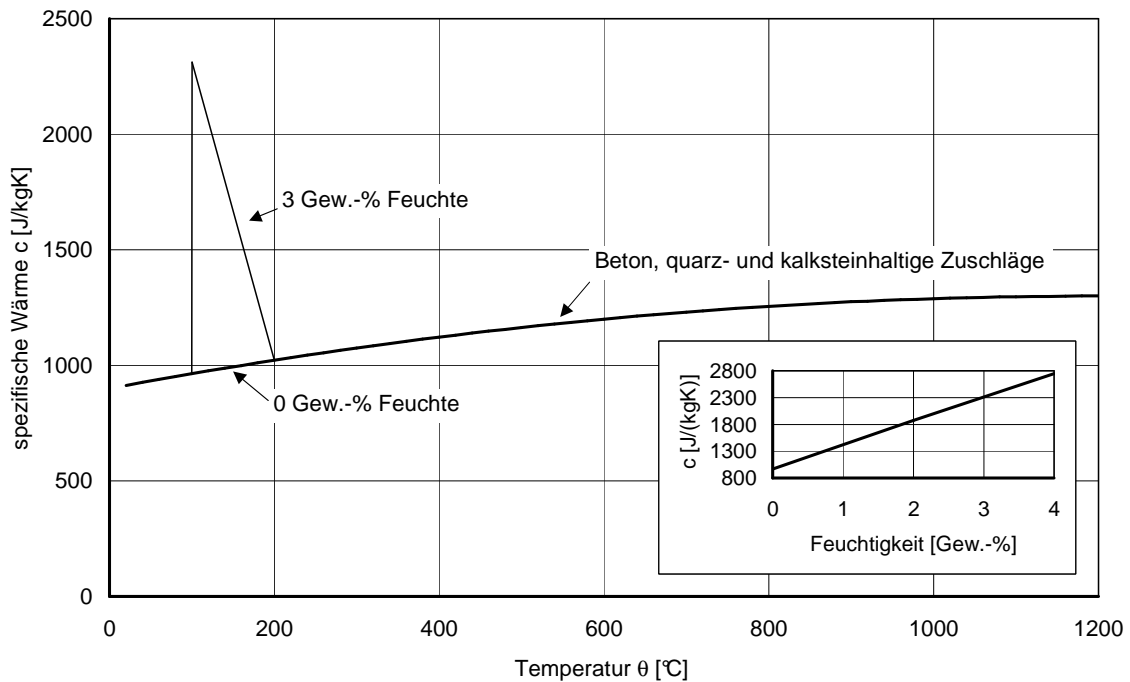


Bild 6.5 Rechenwerte der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität von Beton

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. (6.10) – oder die Sicherheit verkleinert – hierfür gilt Gl. (6.11):

$$X_{fi,d} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.10)$$

$$X_{fi,d} = X_{k,\theta} \cdot \gamma_{M,fi} \quad (6.11)$$

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 Anwendungsdokumenten 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 beflamten Querschnittsrändern – sollte eine feinere Diskretisierung als im Querschnittsinneren vorgenommen werden.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

- Elementgrößen mit maximal 2 - 3 cm Kantenlänge sollten nicht überschritten werden.
- Die Länge der Elementseiten sollten im Verhältnis kleiner oder gleich 1:2 gewählt werden.
- Symmetriebedingungen hinsichtlich der Beflammung 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 unbedeckten Stahlquerschnitten ca. 2 - 5 Minuten und bei bedeckten Stahlquerschnitten weniger oder gleich 1 Minute betragen.
- Für Stahlbetonquerschnitten 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 [6.21].

6.5.5.3 Mechanische Analyse

6.5.5.3.1 Mechanische Einwirkungen

Im Eurocode 1 Teil 2-2 wird zwischen direkten und indirekten Einwirkungen unterschieden. Als direkte Einwirkungen werden die bei der kalten Bemessung berücksichtigten Belastungen (Eigengewicht, Wind, Schnee, usw.) bezeichnet (s. Eurocode 1 Teil 2-2, Anhang F). Indirekte Einwirkungen infolge Brandbeanspruchung sind Kräfte und Momente, die durch thermische Ausdehnungen, Verformungen und Verkrümmungen hervorgerufen werden. Sie brauchen bei der brandschutztechnischen Bemessung von Einzelbauteilen und von Teil- und Gesamttragwerken nicht berücksichtigt zu werden, sofern sie das Tragverhalten nur geringfügig beeinflussen und / oder durch entsprechende Ausbildung der Auflager aufgenommen werden. Als indirekte Einwirkungen kommen Zwangkräfte 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 Ein-

wirkung $\psi_{1,1}$ 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 $E_{d,fi,t}$ während der Brandeinwirkung nach Gl. (6.12) festgelegt:

$$E_{d,fi,t} = \sum \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (6.12)$$

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 Eurocode 1 Teil 1 (s. Tabelle 6.2)

Als Vereinfachung dürfen die Einwirkungen während der Brandbeanspruchung direkt aus den Einwirkungen bei Normaltemperatur nach Gl. (6.13) ermittelt werden:

$$E_{d,fi,t} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (6.13)$$

mit

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

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi} \quad (6.14)$$

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

Bild 6.6 zeigt die Auswertung von Gl. (6.14) mit Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$ für verschiedene Kombinationsbeiwerte $\psi_{1,1}$.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

Tabelle 6.2 Kombinationswerte für veränderliche Einwirkungen

Einwirkungen	Kombinationsbeiwert		
	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Verkehrslast auf Decken			
Wohnräume; Büroräume, Verkaufsräume bis 50 m ² ; Flure; Balkone; Räume in Krankenhäusern	0,7	0,5	0,3
Versammlungsräume; Garagen und Parkhäuser; Turnhallen; Tribünen; Flure in Lehrgebäuden; Büchereien; Archive	0,8	0,8	0,5
Ausstellungs- und Verkaufsräume; Geschäfts- und Warenhäuser	0,8	0,8	0,8
Windlasten	0,6	0,5	0
Scheelasten	0,7	0,2	0
Andere Einwirkungen	0,8	0,7	0,5

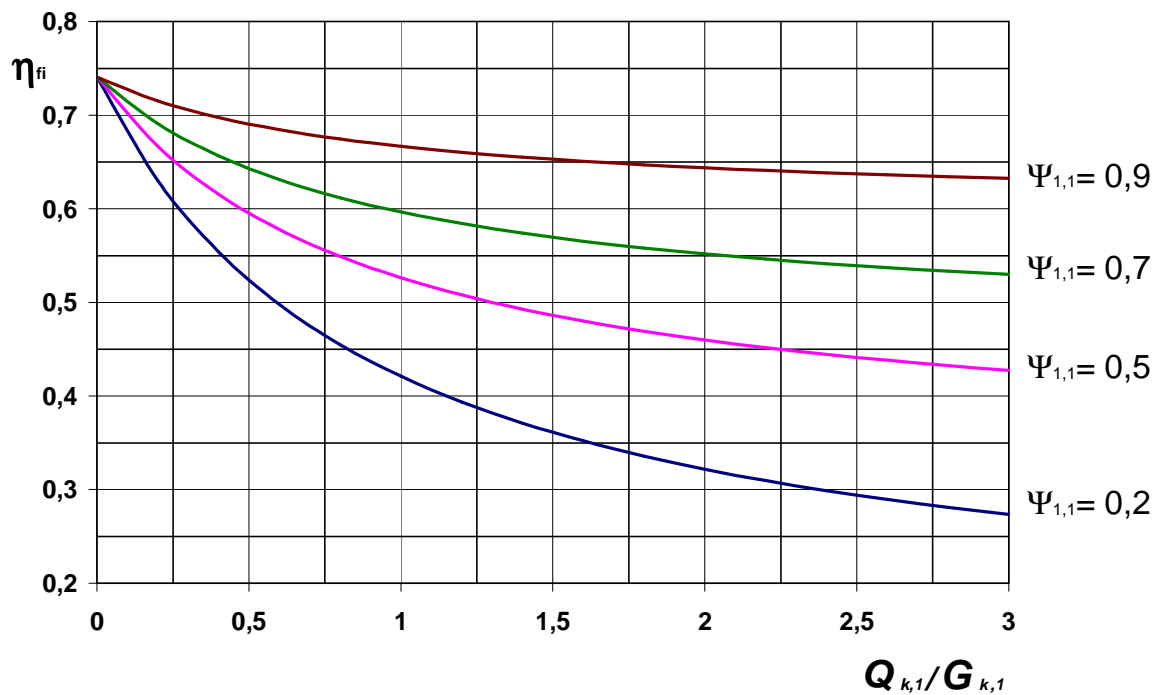


Bild 6.6 Reduktionsfaktor η_{fi} in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen ständiger und dominierender veränderlicher Einwirkung ($\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$)

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 und 4	0,7
3 und 5	0,65

6.5.5.3.2 Bauteil- und Tragwerksanalyse

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 6.5.5.2.2 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 $M_{Rd,fi}$ und die Momentenbeanspruchung in Feldmitte $M_{Ed,fi}$ gegenübergestellt werden. Im brandschutztechnischen Nachweis wird $M_{Ed,fi} \leq M_{Rd,fi}$ nachgewiesen (Bild 6.7).

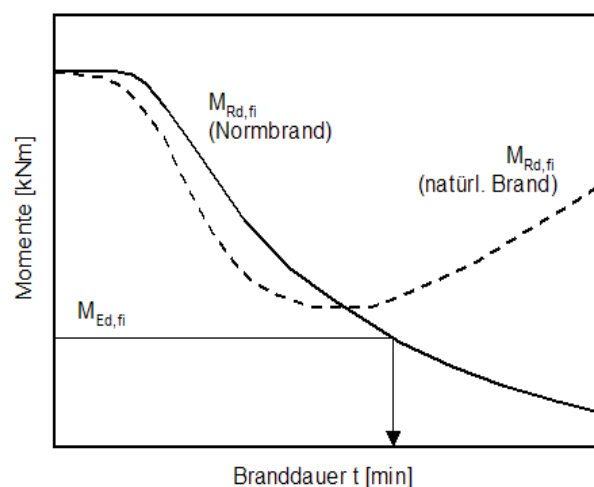


Bild 6.7 Prinzipieller Verlauf der Biegetragfähigkeit und der Momentenbeanspruchung bei einem statisch bestimmt gelagerten Balken

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

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 6.8 temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Beton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen, in Bild 6.9 für kaltverformten Betonstahl (BSt 500 S) und in Bild 6.10 für Baustahl dargestellt. Bild 6.11 zeigt die thermischen Dehnungen für Beton, Betonstahl, Spannstahl und Baustahl.

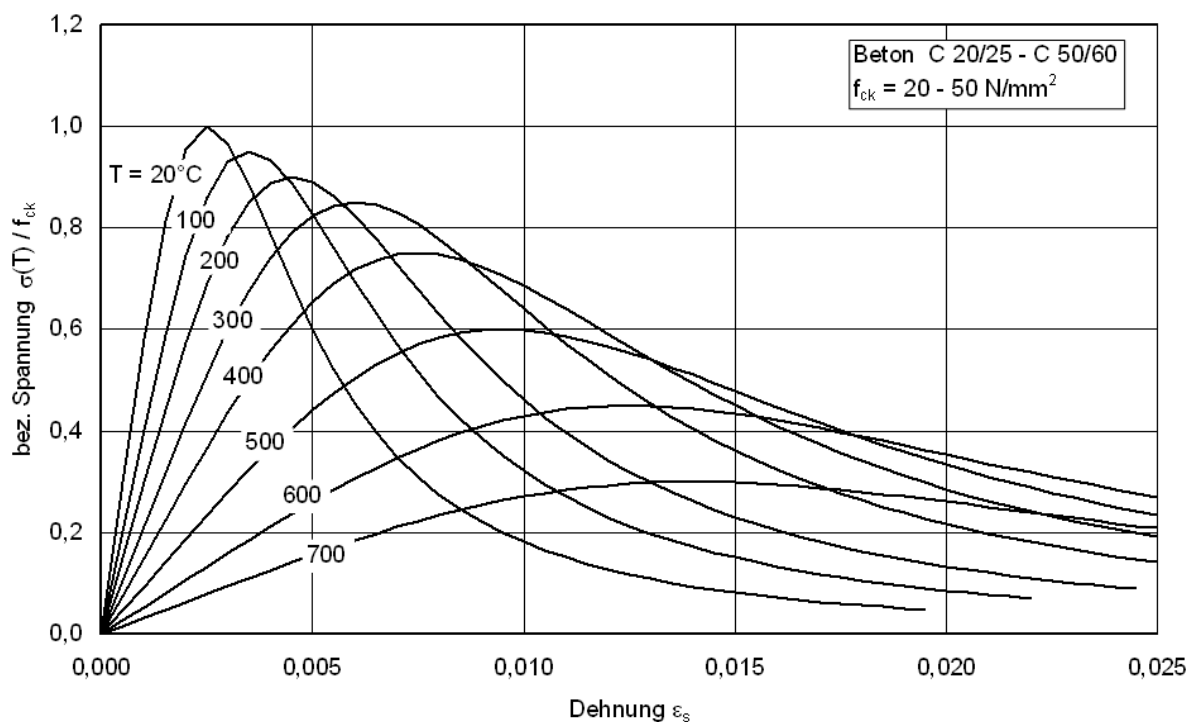


Bild 6.8 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Beton mit überwiegend quarzhaltigen Zuschlägen

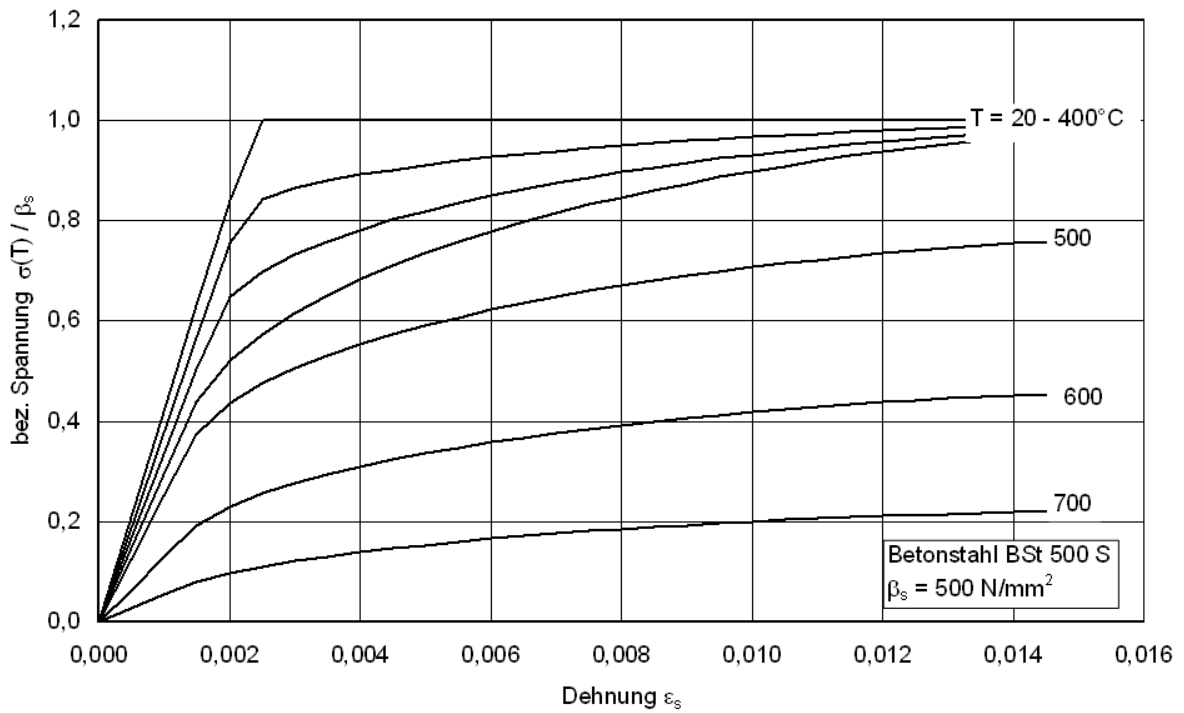


Bild 6.9 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von kaltverformtem Betonstahl (BSt 500 S)

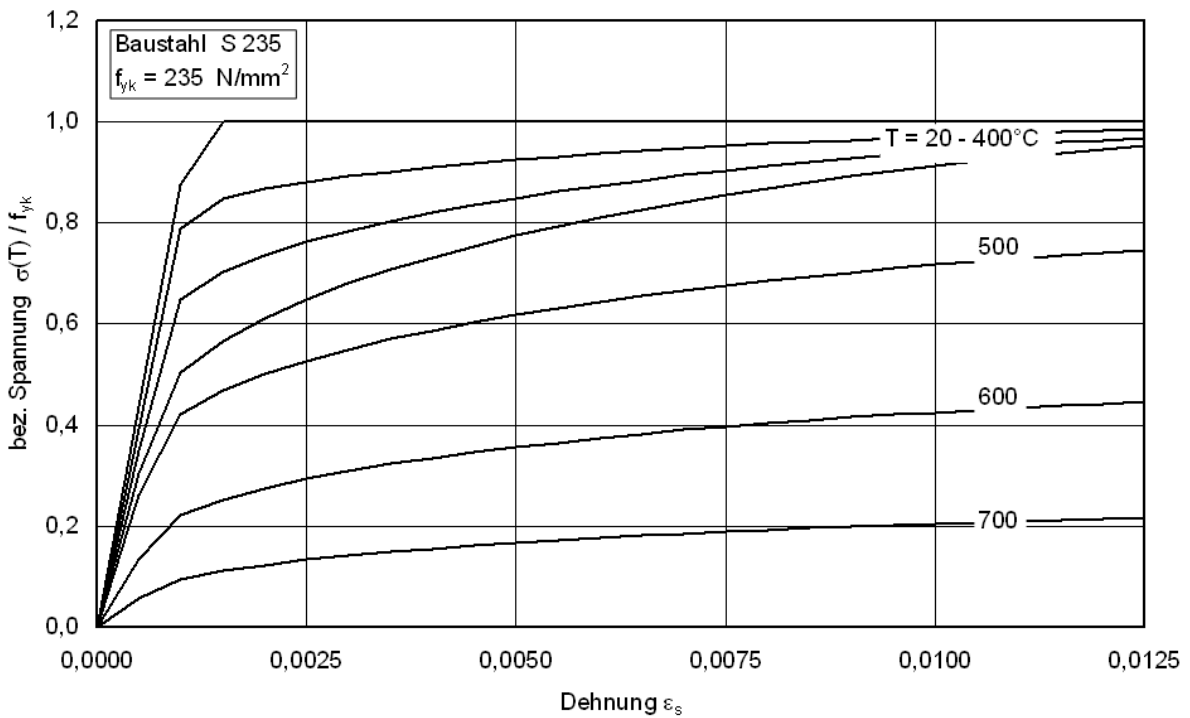


Bild 6.10 Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien von Baustahl

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

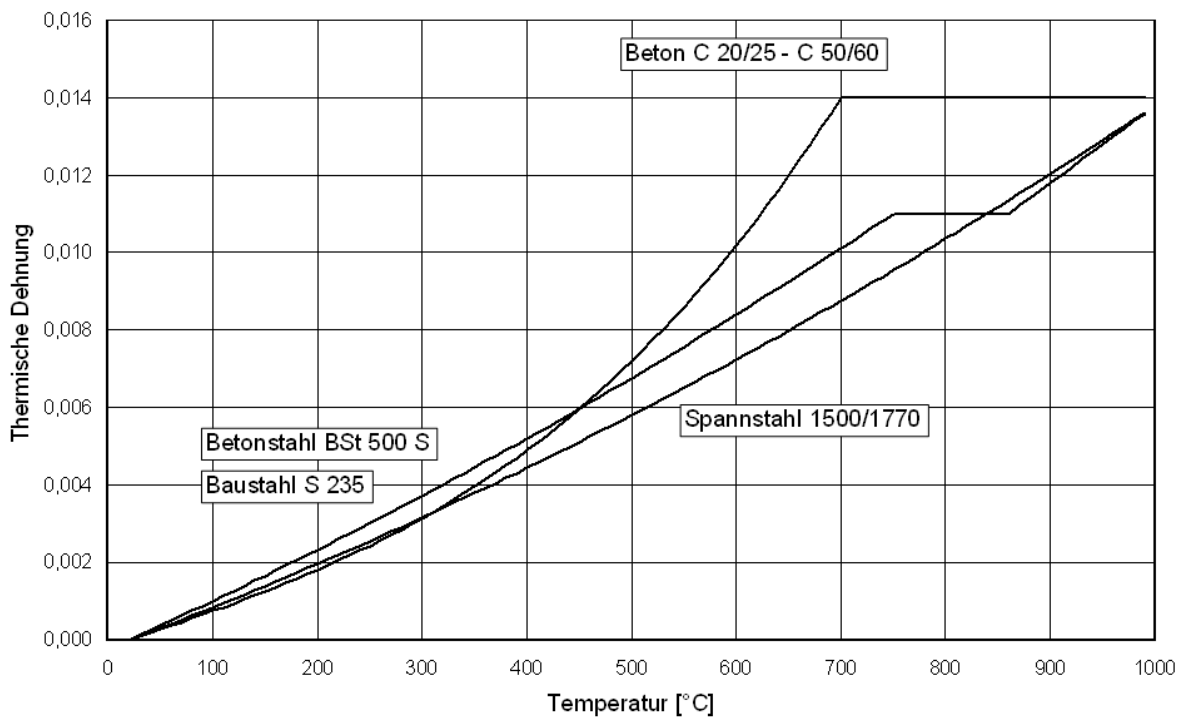


Bild 6.11 Thermische Dehnung von Beton, Betonstahl, Spannstahl und Baustahl

Zur numerischen Beschreibung der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien und der thermischen Dehnungen werden in den Brandschutzteilen der Eurocodes 2, 3 und 4 Gleichungen angegeben. Die Eingangsparameter zur Berechnung der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien sind als charakteristische Werte definiert, ihnen liegt die 5 %-Fraktile der Grundgesamtheit zu Grunde. Beim Beton wird als Festigkeitswert die Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} und beim Betonstahl bzw. Baustahl die Streckgrenze f_{yk} bzw. f_{ay} eingegeben. Beim Spannstahl wird aufgrund des Fehlens einer ausgeprägten Streckgrenze der Wert $0,9 \cdot f_{pk}$ eingegeben. Zur Ermittlung der Bemessungswerte werden die charakteristischen Werte durch die von den Streuungen der Baustoffkennwerte abhängigen Teilsicherheitsbeiwerte γ_M dividiert. Die Bemessungswerte der mechanischen Kennwerte ergeben sich nach Gl. (6.15):

$$X_{fi,d} = k_{\Theta} \cdot \frac{X_{k,\Theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.15)$$

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 Anwendungsdokument zu $\gamma_{M,fi} = 1,0$ gesetzt.

Im Eurocode 5 Teil 1-2 werden die Bemessungswerte der Festigkeit und des E-Moduls abweichend von Gl. (6.15) und unterschiedlich für Berechnungen der Tragfähigkeit und der Verformungen festgelegt. Wegen fehlender Detailangaben im Eurocode 5 Teil 1-2 (s. Abschnitt 6.5.5.1) werden die Eingangsparmeter für die mechanischen Materialkennwerten von Holz nicht weiter erläutert.

6.5.5.4 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 Branddauer 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 6.5.5.2.2 verändert werden. Beispielsweise ist der Verdampfungsvorgang des Porenwassers im Beton kein reversibler Vorgang, so dass die in Bild 6.5 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 [6.22] wird zur Berechnung der abnehmenden Bauteiltemperaturen vorgeschlagen, vom Wendepunkt der Temperaturen (Punkt K in Bild 6.12) mit der an die maximale Temperatur gekoppelten Temperaturleitzahl a bis zur völligen Abkühlung zu rechnen.

Die Auswirkungen der irreversiblen thermischen Materialkennwerte auf die Temperaturverteilung in einem quadratischen Betonquerschnitt mit $b = 200$ mm zeigt Bild 6.13. Dargestellt sind die Isothermen nach 60 Minuten Branddauer: die dicken Linien gelten mit Berücksichtigung, die dünnen Linien ohne Berücksichtigung der irreversiblen thermischen Materialkennwerte.

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

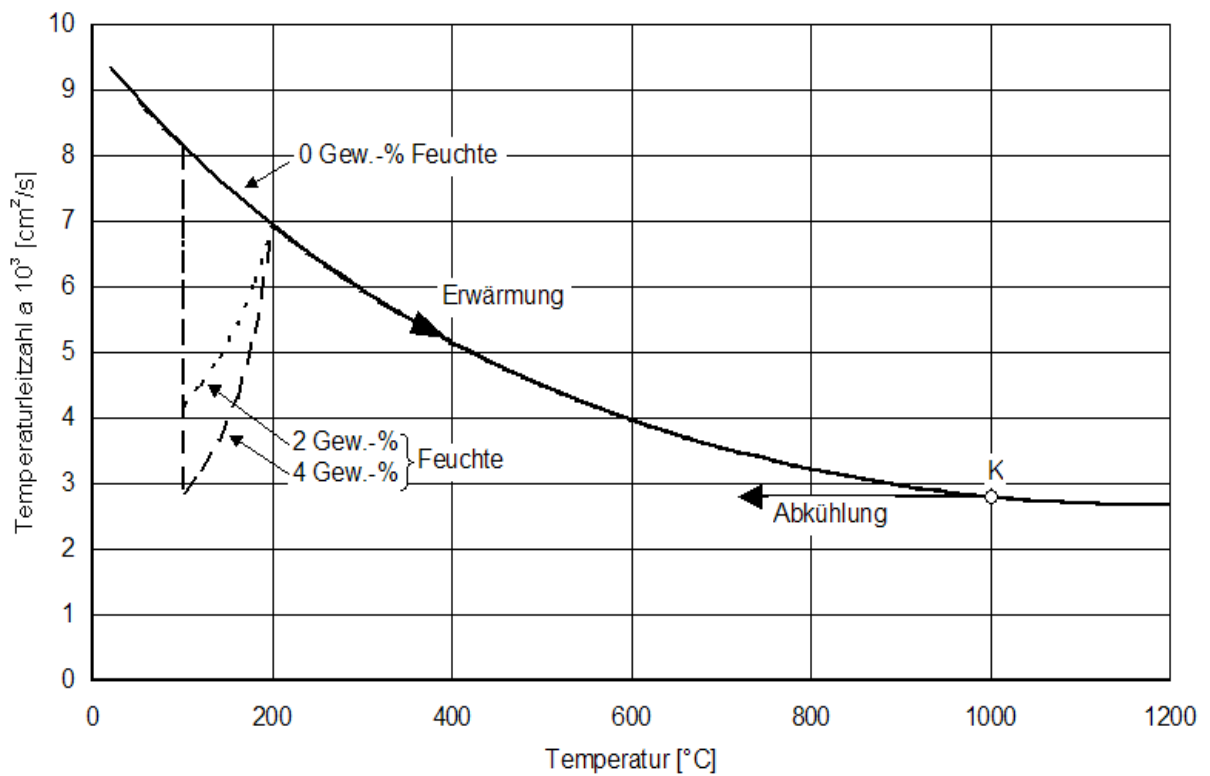


Bild 6.12 Temperaturleitzahl α von Normalbeton mit vorwiegend quarzitischen Zuschlägen für die Erwärmungs- und Abkühlphase

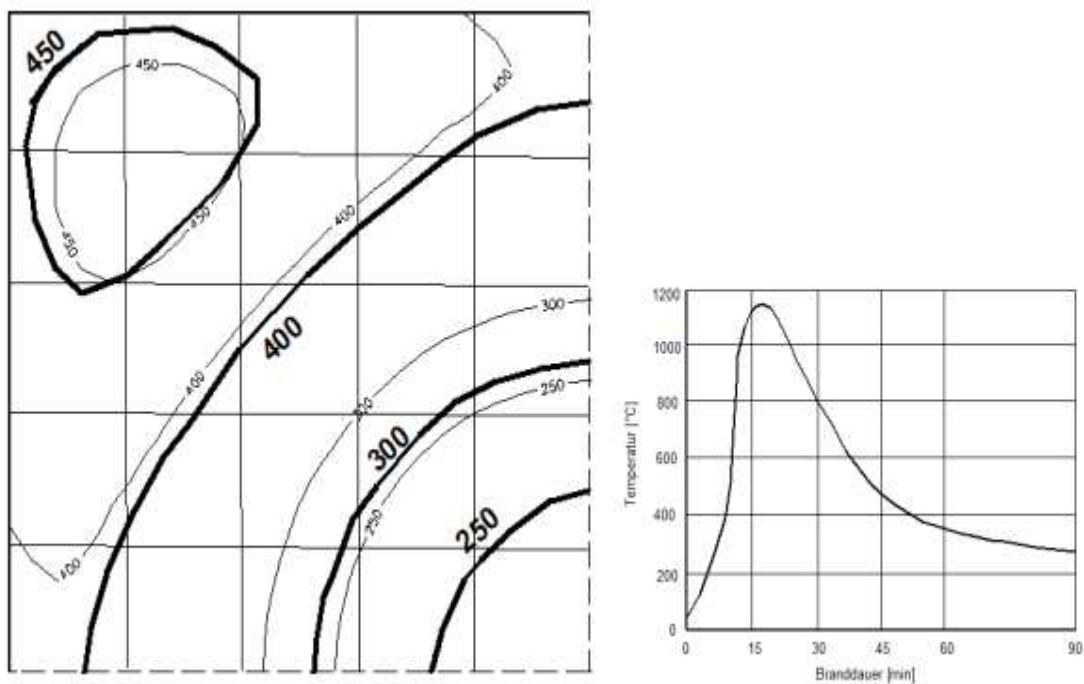


Bild 6.13 links: Isothermen nach 60 Minuten Branddauer mit (dick) und ohne (dünn) Berücksichtigung der irreversiblen thermischen Materialkennwerte; rechts: Heißgastemperaturen

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 [6.23]. 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 beflamnten 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, so dass hier die Spannungs-Dehnungslinie für $T \approx 20 \text{ °C}$ ohne Einschränkungen angewendet werden kann.

Bei Stahlbauteilen werden Erwärmungsgeschwindigkeiten von über 50 K/min nur in ungeschützten Konstruktionen auftreten, bei denen das Versagen dann nach weniger als

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

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 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 wird bei Abkühlung der Scheitelwert der Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der erreichten maximalen Temperatur nach Bild 6.14 reduziert. Bei diesem Näherungsansatz bleiben die während der Abkühlung auftretenden irreversiblen Stauchungen unberücksichtigt [6.24].

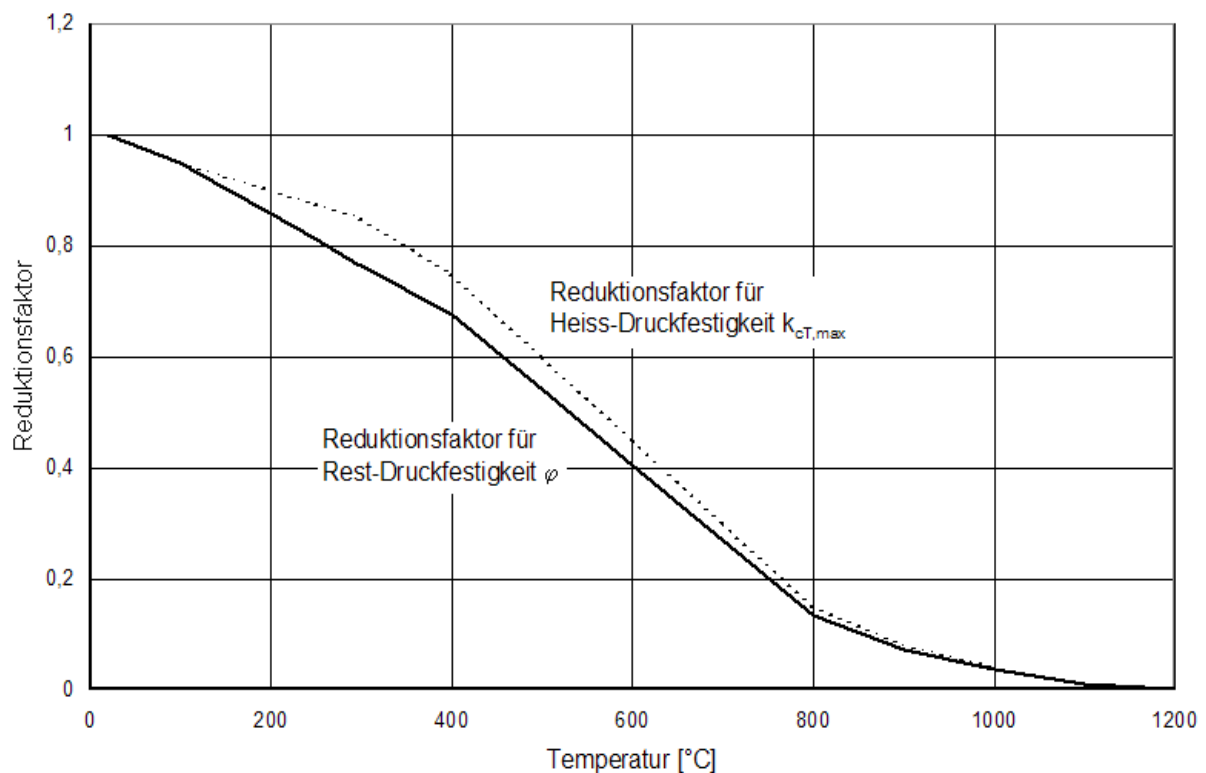


Bild 6.14 Faktor zur Abminderung der Betondruckfestigkeit bei Abkühlung in Abhängigkeit der erreichten maximalen Betontemperatur

Rechenhinweise hinsichtlich der Verformungen und der thermischen Dehnungen bei abfallenden Temperaturen sind in den Eurocodes nicht enthalten. In [6.24] sind einige Messergebnisse von instationären Hochtemperatur-Kriechversuchen mit Betonproben veröffentlicht. Sie zeigen in Abhängigkeit von der erreichten maximalen Temperatur ausgeprägte irreversible bleibende Dehnungen. Bild 6.15 zeigt, dass bei Erwärmung auf ca. 800 °C nach dem Abkühlen bei unbelasteten Proben bleibende Dehnungen von ca. 4 mm/m auftreten (Kurve 1). Werden die Versuche mit 10 % (Kurve 2) oder 60 % (Kurve 3) Lastausnutzung durchgeführt betragen die bleibenden Dehnungen im wiedererkalteten Zustand ca. 5 mm/m.

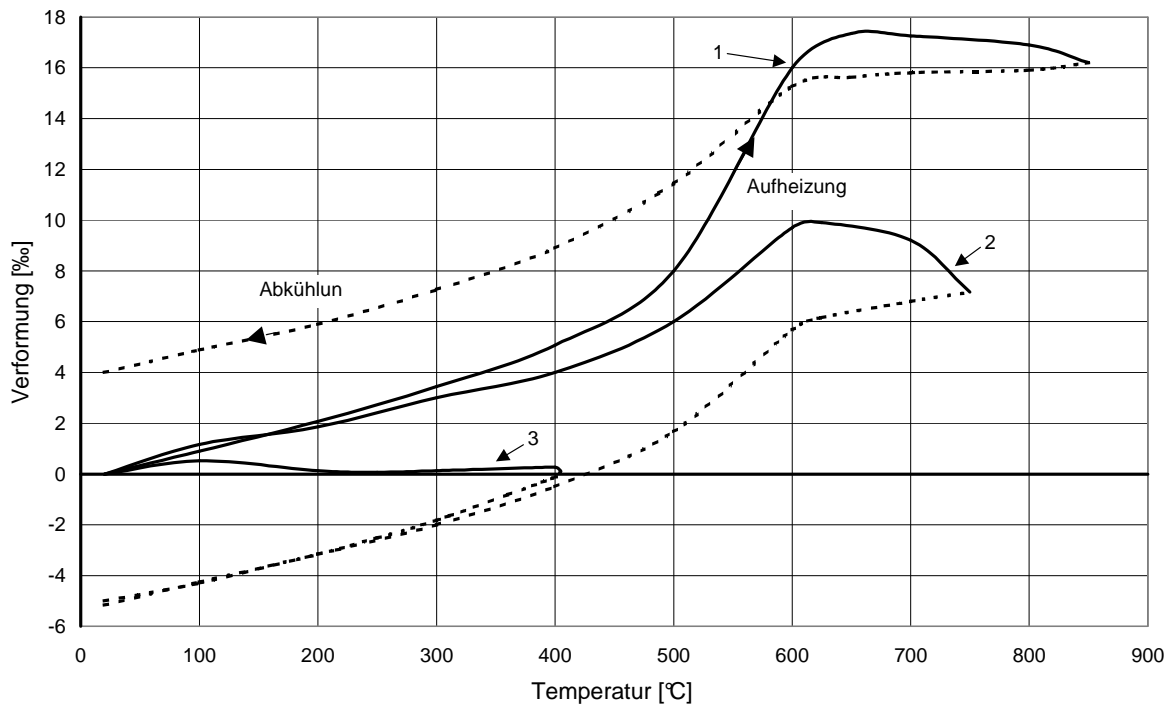


Bild 6.15 Dehnungen von Normalbeton nach dem Aufheizen und Abkühlen

Zusammenfassend gilt für die Spannungs-Dehnungslinien im Bereich abfallender Temperaturen, dass die Betondruckfestigkeit nach den Angaben von Bild 6.14 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 Verbundver-

sagen 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. Um die Gefahr auszuschließen, dass mit nicht abgesicherten und nicht prüffähigen Programmen gearbeitet wird, sind die allgemeinen rechnerischen Nachweisverfahren in Deutschland zurzeit nicht zugelassen. Eine Zulassung ist erst dann vorgesehen, wenn für die Programme Anforderungsprofile und Bewertungsmaßstäbe entwickelt worden sind, die sicherstellen, dass bei Anwendung der Programme das brandschutztechnische Sicherheitsniveau in Deutschland beibehalten wird [6.25].

Die Bewertungskriterien gliedern sich in

- Programmverifikation
- Validierung und Falsifizierung
- Testen durch Eichbeispiele

Durch Programmverifikation kann ein mathematisch exakter Nachweis der Korrektheit des Programms geführt werden. Durch Validierung oder Falsifizierung können die allgemeinen Rechengrundlagen von Programmen mittels einer systematischen Testmethodik überprüft werden. Durch Testen der Programme anhand von Eichbeispielen, mit denen praktisch ein Brandversuch simuliert werden kann, werden alle die Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils beeinflussenden Größen berücksichtigt.

6.6.2 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. Außerdem wurde die Mehrzahl der Programme für Forschungsvorhaben mit einer speziellen Zielsetzung entwickelt und erst nachträglich für eine breitere Anwendung erweitert und umprogrammiert. Damit wird eine Verifikation von Programmen, die für rechnerische Brandschutznachweise eingesetzt werden, nur in Ausnahmefällen von einer in der Informatik / Programmtheorie ausgebildeten Fachkraft erfolgen können. Für die Ingenieurpraxis müssen Testmethoden eingesetzt werden, mit denen die Korrektheit der Programme für ei-

nen 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 [6.26] 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.

6.6.4 Testen durch Eichbeispiele

Mit Hilfe von Eichbeispielen werden programmrechnete 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 Teil 4 oder den Brandschutzteilen der Eurocodes 2 und 4 verwendet werden, wenn alle Randbedingungen für die Tabellen bekannt sind. In [6.26] sind Eichbeispiele enthalten für

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

- 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.

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 [6.26] 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 [6.26] eine Toleranz von 15 % vorgeschlagen. Werden die rechnerischen Ergebnisse 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 Prüfprotokoll

Die entwickelten Bewertungskriterien werden prägnant zusammengefasst in einem Prüfprotokoll, welches für die prüfende Stelle (Bauaufsicht) 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 zugelassen werden.

Die brandschutztechnischen Nachweise mit den auf diese Weise kontrollierten Programmen müssen jedoch wie bei der „Kaltbemessung“ von einem hierfür besonders qualifizierten Prüfsachverständigen 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 Teil 1 [6.9] in Verbindung mit der Industriebaurichtlinie [6.27] 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 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) [6.28].

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_a nach Gleichung (6.16) ermittelt.

$$t_a = q_R \cdot c \cdot w \quad (6.16)$$

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_a muss berücksichtigt werden, ob es sich um ein- oder mehrgeschossige Brandbekämpfungsabschnitte handelt [6.29]. Das Prinzip zur Ermittlung der äquivalenten Branddauer wird in Bild 6.16 dargestellt. Die äquivalente Branddauer t_a 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

6 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

Branddauer t_a ist dann der Zeitpunkt, zu dem die Bauteiltemperatur im Normbrand den maximalen Wert der Bauteiltemperatur bei einem natürlichen Brand erreicht.

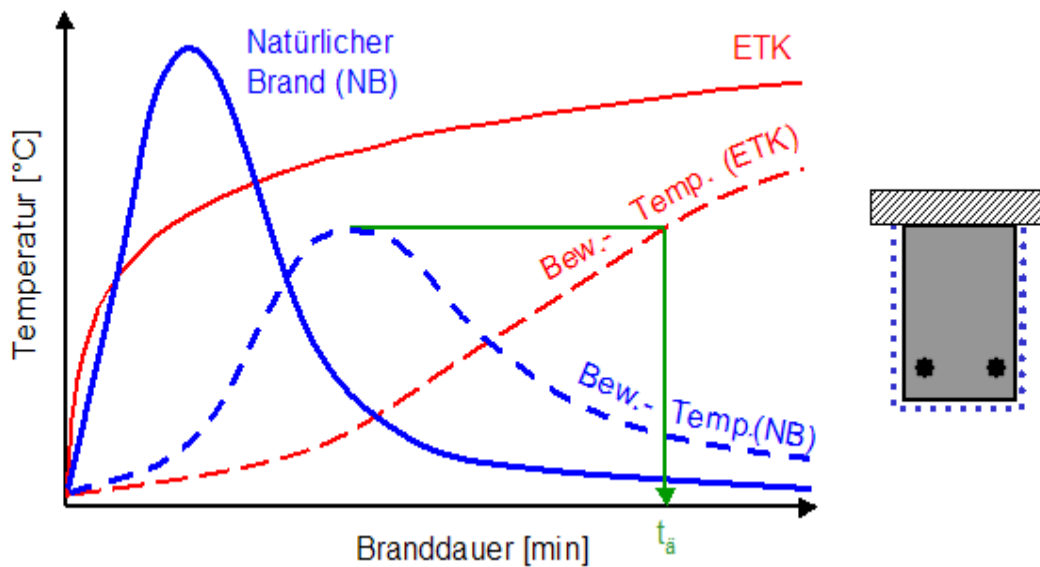


Bild 6.16 Bestimmung der äquivalenten Branddauer t_a

Die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer t_F wird nach Gleichung (6.17) bestimmt.

$$\text{erf } t_F = t_a \cdot \gamma \cdot \alpha_L \quad (6.17)$$

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

Die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer 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

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 stellt 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 und / oder 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 programm berechneten Ergebnisse ist um so 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 überdimensional 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.
- [6.2] DIN V ENV 1991-2-2. Eurocode 1. Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen im Brandfall. Vornorm Ausgabe Mai 1997.
- [6.3] DIN V ENV 1992-1-2. Eurocode 1. Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Vornorm Ausgabe Mai 1997.
- [6.4] 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.
- [6.5] DIN V ENV 1994-1-2. Eurocode 4. Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton. Teil 1-2: Allgemeine Regeln Tragwerksbemessung für den Brandfall. Vornorm Ausgabe Juni 1997.
- [6.6] DIN V ENV 1995-1-2. Eurocode 5. Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Vornorm Ausgabe Mai 1997.
- [6.7] DIN V ENV 1996-1-2. Eurocode 6. Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Vornorm Ausgabe Mai 1997.
- [6.8] DIN V ENV 1999-1-2 – Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Vornorm Ausgabe Mai 1998.
- [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] DIN Fachbericht. Nationales Anwendungsdokument (NAD)
Nr. 91: Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1991-2-2,
Nr. 92: Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1992-1-2,
Nr. 93: Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1993-1-2,

- Nr. 94: Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1994-1-2,
 Nr. 95: Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1995-1-2,
 Nr. 96: Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1996-1-2,
 Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [6.13] *WATHLING, K.-D.*: Anwendung der Eurocodes im bauaufsichtlichen Verfahren. Beitrag in: Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes. Beuth-Kommentar, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 1. Auflage 2000.
- [6.14] *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.
- [6.15] DIN V ENV 1992-1-1. Eurocode 2. Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1: Grundlagen für den Hochbau, Juni 1992.
- [6.16] ECCS-Technical Committee T3 – Fire Safety of Steel Structures: Design Manual on the European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures, 1985.
- [6.17] *CAJOT, L. G.; SCHLEICH, J. B.; Hass, R.*: The Fire Design of Composite Beams According to the Eurocode 4. Part 10. Structural Fire Design, Nordic Steel Colloquium in Odense / Denmark, 1991.
- [6.18] *DORN, T.*: Brandschutzbemessung im Verbundbau. Beitrag in: Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes, Beuth-Kommentar, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich. 1. Auflage 2000.
- [6.19] *HOSSER, D.; DORN, T.; EL-NESR, O.*: Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen. Stahlbau 63, Heft 3, 1994.
- [6.20] *STEINERT, C.*: Bestimmung der Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall. Abschlussbericht im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn, Az.: Ko 204 / 38 - 1, Braunschweig, 1996.
- [6.21] *KORDINA, K.; EHM, H; POSTEL, R.*: Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 230, Berlin, 1975.
- [6.22] *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.
- [6.23] *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 Nachweise für Bauteile und Tragwerke

- [6.24] *SCHNEIDER, U.; DIEDERICHS, U.; WEIß, R.*: Hochtemperaturverhalten von Festbeton. Sonderforschungsbereich 148 – Brandverhalten von Bauteilen. Arbeitsbericht 1975 - 1977. Teil II, Technische Universität Braunschweig, Juli 1977.
- [6.25] *ZEHFUß, J.; RICHTER, E.*: Bewertungskriterien für rechnerische Brandschutznachweise nach den Eurocodes. Braunschweiger Brandschutztag '99. 8. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig, Heft 145, Braunschweig, 1999.
- [6.26] *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.
- [6.27] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau – Fassung März 2000. DIBt Mitteilungen 6 / 2000.
- [6.28] *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.
- [6.29] *KORDINA, K.; MEYER-OTTENS, C.*: Beton Brandschutz Handbuch. 2. Auflage, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 1999.
- [6.30] *HERTEL, H.*: Erläuterungen zum Grundlagendokument Brandschutz. Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin 25 Heft 2 und 3, 1994.
- [6.31] *TWILT, L.; BOTH, C.*: Technical Notes on the realistic Behaviour and Design of Fire exposed Steel and Composite Steel-Concrete Structures. ECSC-project P 1905 7210. SA 112 Part D: TN, TNO Report BI-91-069, April 1991.

7 ANLAGENTECHNISCHER UND ABWEHRENDER BRANDSCHUTZ

7.1 Wirkung von anlagentechnischen und abwehrenden Maßnahmen auf das Brandszenario

7.1.1 Allgemeines

Die im Industriebau vorhandene brandschutztechnische Infrastruktur beeinflusst die Brandentwicklung maßgeblich. Ihre Wirkung auf das Brandgeschehen lässt sich durch den Effekt auf den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrates beschreiben.

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 Energiefreisetzungsrates abhängt.

Automatische Brandmeldeanlagen verkürzen die Alarmierungszeit, so dass die Brandbekämpfung der Feuerwehr dadurch zu einem deutlich früheren Zeitpunkt angenommen werden kann. Sie beeinflussen in erster Linie den für die Bemessung anzunehmenden Gesamtenergiegehalt der Kurve (siehe Bild 7.3).

Löschanlagen reduzieren das Maximum des zeitlichen Verlaufes der Energiefreisetzungsrates. Im Industriebau und Gewerbe übliche Löschanlagen sind:

- Sprinkleranlagen
- Sprühwasserlöschanlagen
- Schaumlöschanlagen
- Inergenlöschanlagen
- CO₂-Löschanlagen
- Pulverlöschanlagen

Der zeitliche Ablauf der Löschmaßnahmen lässt sich folgendermaßen beschreiben:

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

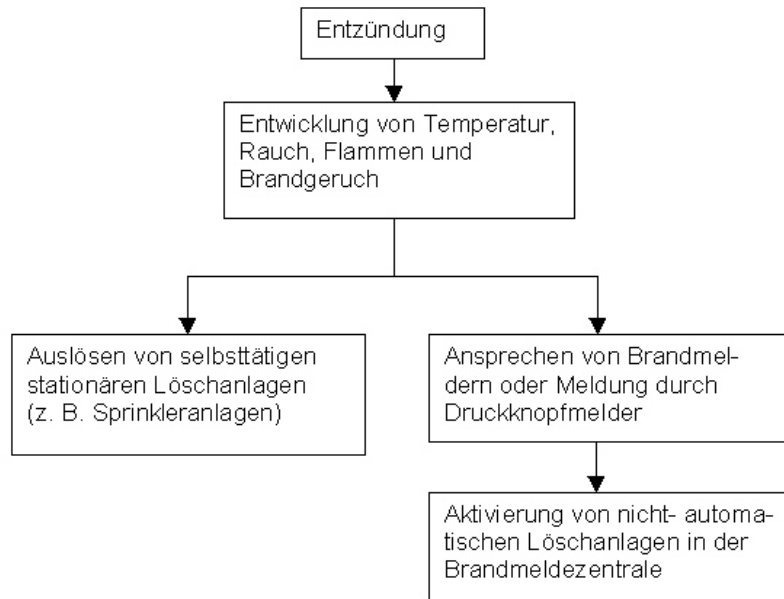


Bild 7.1 Ablaufdiagramm für die Brandbekämpfung durch Löschanlagen

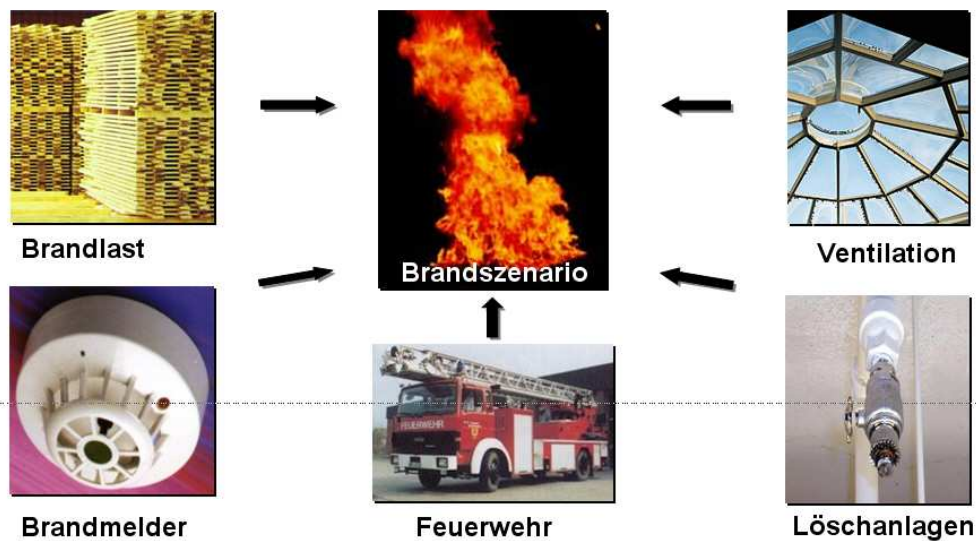
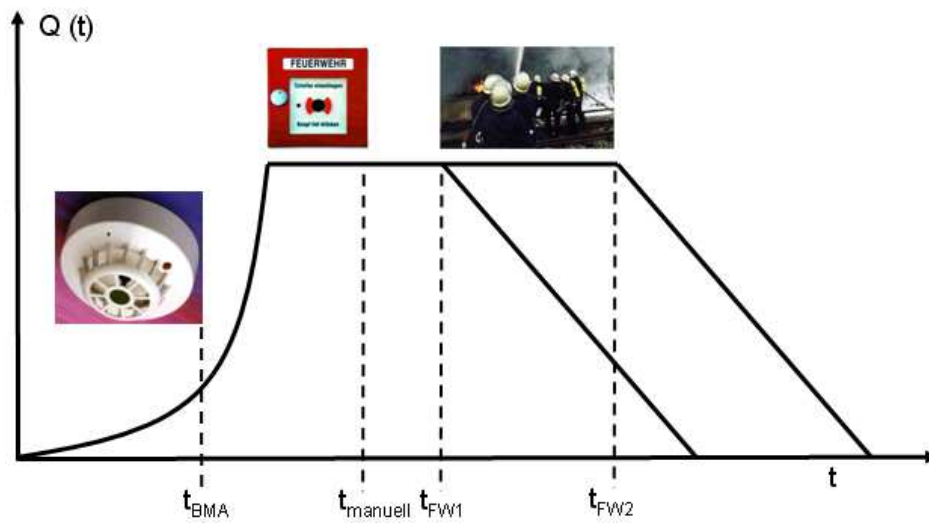


Bild 7.2 Einflüsse auf das Brandszenario

7.1.2 Wirkung von Brandmeldeanlagen

Die Brandentwicklungsdauer wird neben der Hilfsfrist der Feuerwehr auch von der Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Alarmierung bestimmt. Nach [7.1] beträgt der Zeitbedarf bis zur Alarmierung bei Vorhandensein einer automatischen Brandmeldeanlage (BMA) mit Aufschaltung zur Feuerwehr maximal 1,5 Minuten.

Wenn keine BMA vorhanden ist, kann die Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Alarmierung nur schwierig quantifiziert werden. Nach Angaben in [7.2] kann für die Alarmierungszeit in diesem Fall pauschal von einer Zeitdauer von 5 Minuten ausgegangen werden.



t_{FW1} : Start manuelle Brandbekämpfung mit BMA

t_{FW2} : Start manuelle Brandbekämpfung ohne BMA

Bild 7.3 Einfluss von automatischen Brandmeldeanlagen auf den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrates

7.1.3 Wirkung von Löschanlagen

Der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrates bei Bränden, die von der 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)
- Raumhöhe
- Dimensionierung der Löschanlage (Abstand der Löschdüsen, Menge des freigesetzten Löschmittels)
- Abklingverhalten des Brandes 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 Anlage in der Brandentwicklungsphase auslöst, bevor das Maximum der Energiefreisetzungsrates erreicht wurde und der Brand ventilations- oder brandlastgesteuert verläuft.

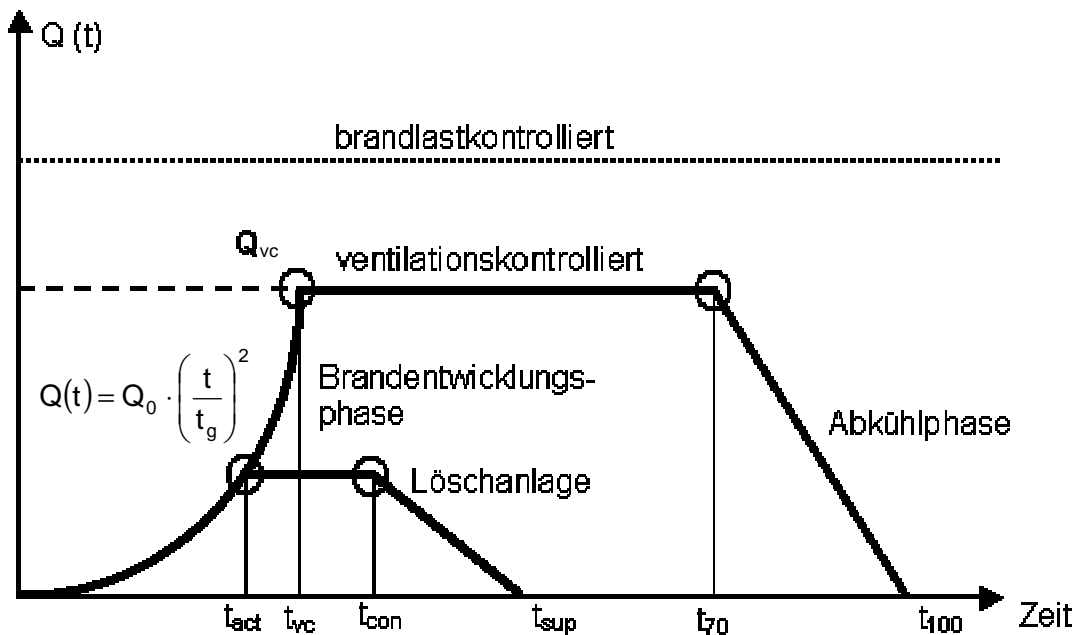


Bild 7.4 Zeitlicher Verlauf der Energiefreisetzungsrate bei Begrenzung durch Brandlast, Ventilation oder Löschanlagen

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 7.1 Ansprechempfindlichkeit von Sprinklern

Ansprechempfindlichkeitsklasse	Response Time Index [(ms) ^{0,5}]
standard	> 80 ≤ 200
spezial	50 bis 80
schnell	< 50

Weiterhin wird der Auslösezeitpunkt von der radialen Entfernung der Sprinkler-Achse zur 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 seines Abstandes von der Plume-Achse bestimmt werden.

Gemäß [7.3] kann vereinfacht angenommen werden, dass die Energiefreisetzungsrate 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 (siehe Bild 7.5). Die lineare Beschreibung des abklingenden Bereiches der Kurve stellt eine rechentechnische Vereinfachung dar. In der Realität ergibt sich analog zur Brandwachstumsphase ein konkaver Kurvenverlauf (siehe Bild 4.1).

Die Zeitdauer bis zur Brandeindämmung wird für jede Energiefreisetzungsrate Q_{LK} gleich angenommen mit der Begründung, dass bei größerer Brandfläche auch eine höhere Anzahl Sprinkler auslöst. Dabei muss natürlich vorausgesetzt werden, dass der Fließdruck auch bei Einsatz vieler Sprinkler nicht zu stark absinkt (Auslegung der Anlage).

Der Verlauf der Energiefreisetzungsrate ergibt sich folgendermaßen (siehe [7.4]):

$$0 - t_{act}: \quad Q(t) = \left(\frac{t}{t_g} \right)^2 \quad [MW] \quad (7.1)$$

$$t_{act} - t_{con}: \quad Q(t) = Q_{LK} \quad [MW] \quad (7.2)$$

$$t_{con} - t_{sup}: \quad Q(t) = \frac{Q_{LK}}{t_{sup} - t_{con}} \cdot (t_{sup} - t) \quad [MW] \quad (7.3)$$

mit

t_{act} Sprinklerauslösezeit [s]

t_{con} Zeitpunkt der Brandkontrolle [s]

t_{sup} Zeitpunkt der Brandeindämmung [s]

Q_{LK} Maximum der Energiefreisetzungsrate im löschanlagenkontrollierten Fall [MW]

Bild 7.5 zeigt beispielhaft den Brandverlauf bei einer Brandentwicklungszeit von 150 s, einer Raumhöhe von 6 m, einem radialen Abstand der Plume-Achse zu den Sprinklern von 2,8 m und einem RTI-Wert von $80 \text{ (ms)}^{0,5}$.

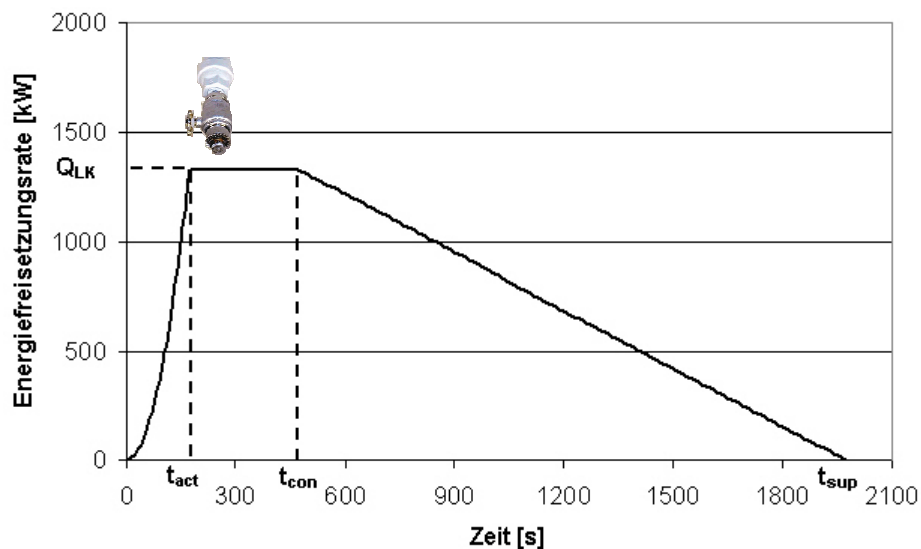


Bild 7.5 Brandverlauf in Form des Verlaufes der Energiefreisetzungsrate bei Einsatz einer Sprinkleranlage (alle Modellgrößen mit ihren Nennwerten eingesetzt)

7.1.4 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 Energiefreisetzungsrate nach Gl. (4.2), Kapitel 4.4.1.3, falls der Brand ventilationsgesteuert verläuft (siehe Bild 7.6). Außerdem wird der verbesserte Wärmeabzug bei der Berechnung der mittleren Heißgastemperatur im brandlastgesteuerten Fall berücksichtigt (siehe Bild 7.7).

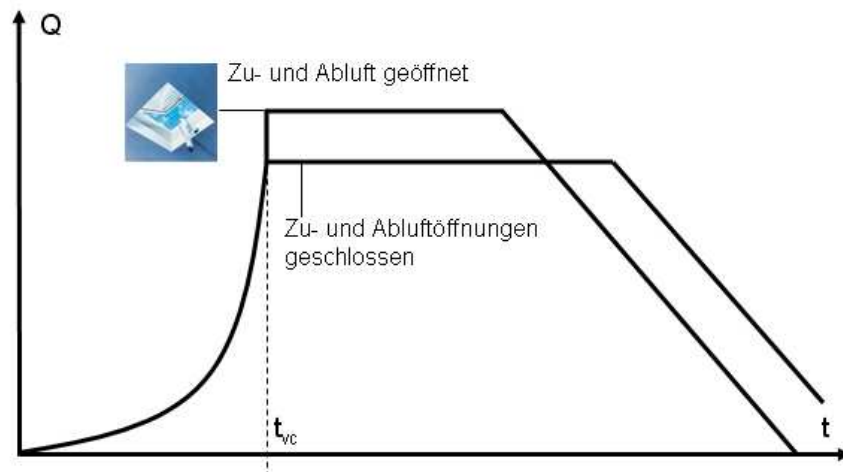


Bild 7.6 Einfluss von Rauch- und Wärmeabzügen auf das Brandszenario im ventilationsgesteuerten Fall

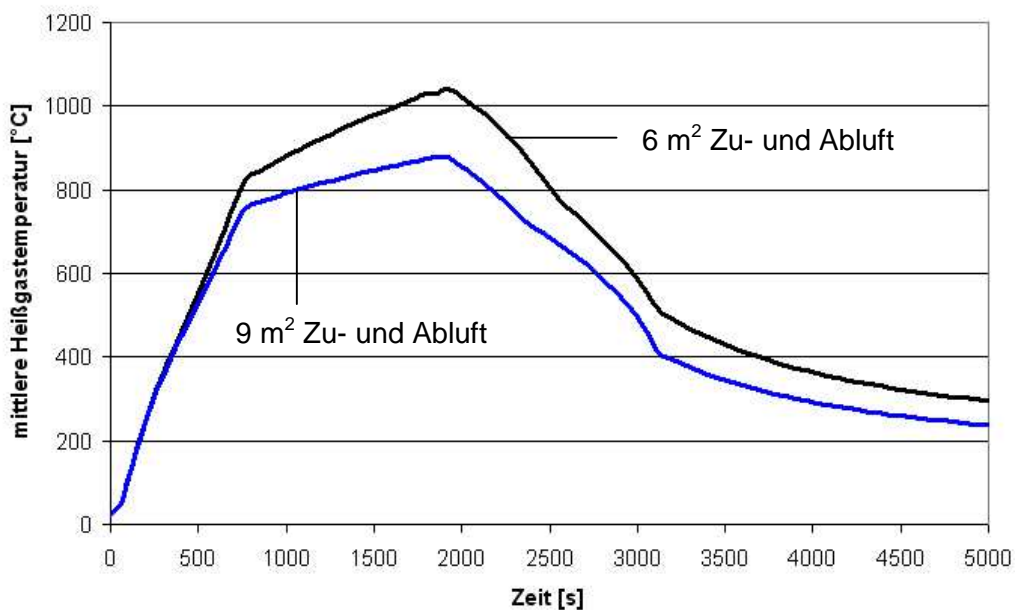


Bild 7.7 Berücksichtigung des Einflusses des verbesserten Wärmeabzuges durch größere Ventilationsöffnungen auf die mittlere Heißgastemperatur im brandlastgesteuerten Fall

7.1.5 Wirkung von abwehrenden Brandschutzmaßnahmen

Maßgebend für den Einfluss einer Feuerwehr auf den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrates ist der Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten bzw. die Zeitdauer bis zur Brandkontrolle. Expertenaussagen zufolge kann für anerkannte Werkfeuerwehren eine Brandentwicklungsdauer von 5 Minuten angenommen werden, wenn eine automatische Brandmeldung vorausgesetzt werden kann und keine genaueren Informationen bekannt sind.

Im Einzelfall muss objektspezifisch überprüft werden, mit welchen Alarmierungszeiten und Hilfsfristen gerechnet werden muss, da diese Zeiten von mehreren Einflussfaktoren beeinflusst werden:

- Art des Brandszenarios
- Anwesenheit von Betriebspersonal
- automatische Brandmeldung
- Zugänglichkeit des Brandraumes
- Entfernung zur Wache

Entscheidend für die Beantwortung der Frage, ob bei einer bestimmten Größenordnung eines Brandes überhaupt noch ein Einfluss auf die Energiefreisetzungsrates angenommen werden kann, ist die Überprüfung der Brandfläche zum Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten in Abhängigkeit der Brandentwicklung. Es existieren Grenzwerte für Brandflächen, die von Einzelpersonen und Feuerwehren gelöscht werden können (s. Kapitel 7.5.2).

Es wird konservativ angenommen, dass die Energiefreisetzungsrates nach Beginn der Löscharbeiten für eine Dauer von 5 Minuten konstant verläuft. Die Geschwindigkeit des linearen Abfalls hängt von der maximal auftretenden Brandfläche ab. Je größer diese Brandfläche, desto länger dauert es, bis der Brand komplett eingedämmt ist. Von der Brandfläche kann näherungsweise auf die maximale Energiefreisetzungsrates geschlossen werden. Die Grenzwerte wurden auf Basis von Expertenaussagen festgelegt:

$$Q \leq 20 \text{ MW} \quad t_4 = 30 \text{ min} \quad (7.4)$$

$$20 \text{ MW} < Q \leq 50 \text{ MW} \quad t_4 = 45 \text{ min} \quad (7.5)$$

$$Q > 50 \text{ MW} \quad t_4 = 60 \text{ min} \quad (7.6)$$

In Bild 7.8 ist der qualitative Verlauf der Energiefreisetzungsrates bei Einsatz einer anerkannten Werkfeuerwehr dargestellt. Bezüglich der Bezeichnung des Maximums der Energiefreisetzungsrates muss unterschieden werden, ob der Zeitpunkt t_{act} in der Brandentwicklungsphase liegt (Q_{FK}) oder in der Phase des brandlast- bzw. ventilationskontrollierten Brandes (Q_{fc} bzw. Q_{vc}). Die lineare Beschreibung des abklingenden Bereiches der Kurve stellt eine rechentechnische Vereinfachung dar. In der Realität ergibt sich analog zur Brandwachstumsphase ein konkaver Kurvenverlauf (siehe Bild 4.1).

Der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrates ergibt sich wie folgt:

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

$$0 - t_{\text{act}}: \quad Q(t) = \left(\frac{t}{t_g} \right)^2 \quad [\text{MW}] \quad (7.7)$$

$$t_{\text{act}} - t_{\text{con}}: \quad Q(t) = Q_{\text{max}} \quad [\text{MW}] \quad (7.8)$$

$$t_{\text{con}} - t_{\text{sup}}: \quad Q(t) = \frac{Q_{\text{max}}}{t_{\text{sup}} - t_{\text{con}}} \cdot (t_{\text{sup}} - t) \quad [\text{MW}] \quad (7.9)$$

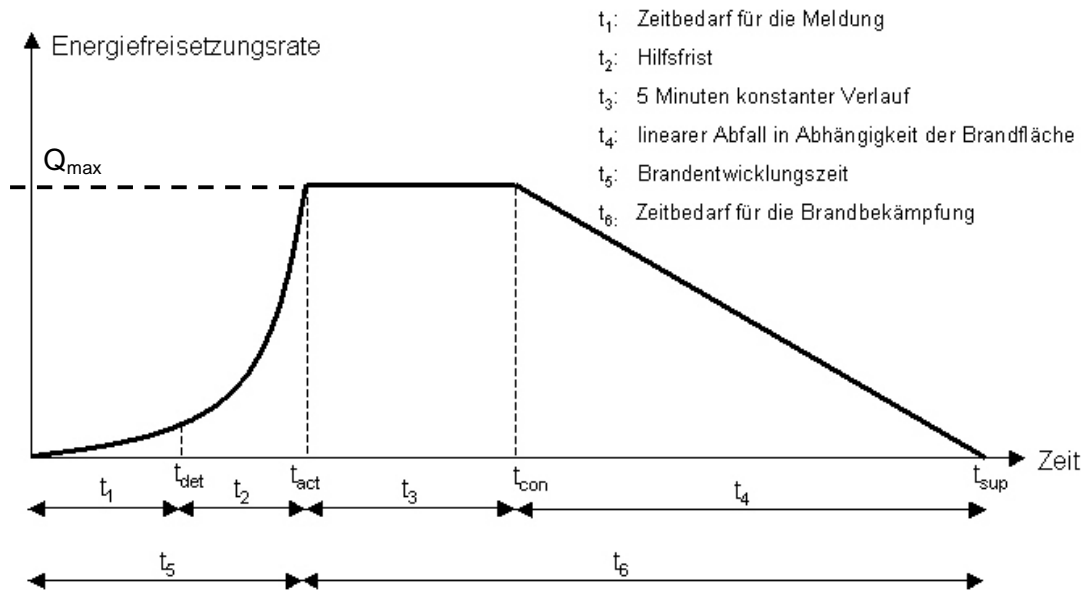


Bild 7.8 Zeitlicher Verlauf der Energiefreisetzungsrates (qualitativ) bei Einsatz einer anerkannten Werkfeuerwehr

Bei öffentlichen Feuerwehren ist der Zeitpunkt der Einflussnahme auf den Brandverlauf weit- aus schwieriger zu quantifizieren als bei anerkannten Werkfeuerwehren, da die Hilfsfristen infolge der sehr unterschiedlichen Entfernung zwischen Feuerwache und Einsatzort eine viel größere Bandbreite aufweisen. Bild 7.9 zeigt den Einsatz der öffentlichen Feuerwehr von der Entzündung bis zum Ablöschen des Brandes in Form eines Ablaufdiagramms.

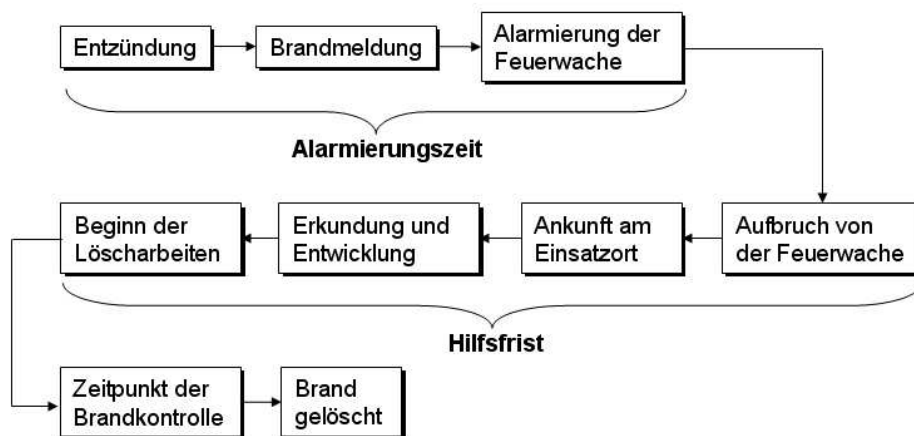


Bild 7.9 Ablaufdiagramm eines Einsatzes der öffentlichen Feuerwehr

Bei der Quantifizierung der Wirkung der öffentlichen Feuerwehr auf das Brandszenario sind zwei Faktoren von Bedeutung:

- Zeitpunkt, ab dem mit Löschmaßnahmen gerechnet werden kann
- Wirksamkeit der Löschmaßnahmen in Abhängigkeit von Ausrüstung und Anzahl der Einsatzkräfte und -fahrzeuge

7.2 Brandmeldeanlagen

7.2.1 Allgemeines

Die Aufgabe einer automatischen Brandmeldeanlage besteht darin, einen Brand im Frühstadium, anhand von Begleiterscheinungen wie Rauch, Flammen, Hitze, Gase usw. klar und eindeutig mit geeigneten Brandmeldern zu erkennen. Nach der Brandentdeckung alarmiert die Anlage selbständig und löst vorprogrammierte Steuerfunktionen aus.



Bild 7.10 Aufbau einer Brandmeldeanlage

Zur Detektion der Brände stehen verschiedenste Brandmelder zur Verfügung. Sie haben die Aufgabe Brandphänomene wie Rauch, Wärme, Flammen usw. frühzeitig zu erkennen und sie von Täuschungsgrößen wie z. B. Zigarettenqualm zu unterscheiden.

- Wärmemelder

Wärmemelder enthalten ein temperaturabhängiges Element. Sie reagieren auf eine maximale Temperatur oder auf einen erforderlichen Temperaturanstieg pro Zeiteinheit. Sie eignen sich zur Erkennung offener Brände.

- Rauchmelder

Bei den Rauchmeldern unterscheidet man zwischen Ionisationsrauchmelder, optischen Rauchmeldern, linearen Rauchmeldern und Luftproben-Rauchmelde-systemen.

- Ionisationsrauchmelder

funktionieren nach dem Prinzip des Ionenflusses. Treten Rauchpartikel in die Messkammer ein, so verändert sich der Ionenfluss, der dann ausgewertet wird. Sie eignen sich zur Detektion fast aller Brände. Besonders empfindlich reagieren sie auf kleine Partikel, wie sie bei Bränden mit Flammenbildung auftreten.

- Optische Rauchmelder

basieren auf dem Streulicht-Prinzip. Lichtquelle, Blende und Lichtempfänger sind so angeordnet, dass keine Lichtstrahlen auf direktem Weg von der Quelle zum Empfänger gelangen können. Erst bei Anwesenheit von Rauchpartikeln wird ein Teil des Lichtes auf den Empfänger gestreut. Dieses Signal wird dann ausgewertet. Sie eignen sich zur Detektion verschiedenster Brände. Besonders empfindlich reagieren sie auf größere Partikel, wie sie bei Bränden mit PVC oder bei Schwelbränden vorkommen.

- Lineare Rauchmelder

funktionieren nach dem Prinzip der Extinktion, d. h. es wird die Lichtabschwächung durch Rauch gemessen. Sie eignen sich daher besonders für Anwendungen in hohen Hallen, wo sich der Rauch vor dem Erreichen der Decke über eine große Fläche ausdehnt.

- Luftproben-Rauchmeldesysteme

bestehen aus einem Rohrsystem mit Ansaugöffnungen, einem Rauchansaugsystem und einem Rauchmelder. Sie werden überall dort eingesetzt, wo die Zugänglichkeit für Punktmelder schlecht ist, wo ein hoher Luftwechsel vorherrscht oder wo Punktmelder aus ästhetischen Gründen nicht erwünscht sind.

- **Flammenmelder**

Flammenmelder sprechen auf die von Bränden ausgehende Strahlung an. Sie messen die Strahlungsenergien im infraroten und / oder ultravioletten Bereich. Flammenmelder erkennen offene Brände rascher als Wärme- oder Rauchmelder; sind jedoch nicht in der Lage, Schwelbrände zu erkennen.

- **Kombinierte Melder**

Vermeht werden in der Praxis kombinierte Brandmelder eingesetzt. Sie erfassen verschiedene Brandphänomene, haben dadurch ein breites Ansprechverhalten und sind wesentlich robuster bezüglich Täuschungsgrößen. Optische Rauchmelder können durch Partikel in der Luft wie Staub oder Abgase beeinflusst werden. Durch die Kombination von Rauch und Temperatur sind Mehrkriterienmelder in der Lage solche Täuschungsgrößen von realen Feuern zu unterscheiden.

- Handfeuermelder

Bei den Handfeuermeldern handelt es sich um nichtautomatische Brandmelder. Sie dienen im Brandfall der manuellen Alarmierung.

Die Brandmelderzentrale dient der Bedienung des Brandmeldesystems und analysiert die Signale der angeschlossenen Geräte. Sie vergleicht diese mit den gespeicherten Werten und aktiviert die entsprechenden Alarm- und Steuergeräte. Optische und akustische Alarmgeräte alarmieren und orientieren die Personen im Gebäude wie auch die internen und externen Interventionskräfte. Die programmierten Sofortmaßnahmen wie akustische Alarmgeräte, optische Signalgeber, Fernübermittlung und Brandfall-Steuerungen werden durch die entsprechenden Steuersignale der Brandmelderzentrale eingeleitet.

Die Tabelle A7.1 im Anhang zu Kapitel 7 gibt einen Überblick bezüglich sinnvoller Einsatzbereiche der gängigen Brandmeldertypen.

Die Planung und Projektierung von Brandmeldeanlagen muss nach den gültigen technischen Regelwerken erfolgen, insbesondere ist die DIN VDE 0833 Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall Teil 1 und 2 zu beachten.

7.2.2 Zuverlässigkeit von Brandmeldeanlagen

Die möglichen Ursachen, die zum Versagen einer automatischen Brandmeldeanlage im Brandfall führen, sind in erster Linie der Ausfall der Energieversorgung, der Ausfall einzelner Komponenten, ungeeignete Brandmelder und ungeeignete Anordnungen der Melder bezogen auf die Brandkenngrößen sowie unzureichende Mengen an Brandkenngrößen.

Zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit der Systemkomponente „Brandmeldeanlage“ wurden Daten aus den folgenden Quellen ausgewertet:

- Studie der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) [7.16] über die Versagenswahrscheinlichkeit von Brandschutzmaßnahmen bei Kernkraftwerken (1985)
- Erhebungen des VdS Schadenverhütung über die Zuverlässigkeit von Brandmeldern (Zeitraum 1979 bis einschließlich 1982 [7.17], Überprüfung von 787 Anlagen)
- Untersuchung von Brandschutzmaßnahmen in Krankenhäusern [7.14] (Auswertung von 700 Bränden über einen Zeitraum von 1999 bis 2000)
- Erhebungen der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen [7.15] (Zeitraum 1996 bis 2000, 40.000 Brandmeldeanlagen in der Schweiz)
- Statistik über die Bewährung von Cerberus-Brandmeldeanlagen für den Zeitraum 1960 bis 1967 [7.16]

Um Brandmeldeanlagen in einem probabilistischen Sicherheitskonzept berücksichtigen zu können, muss die Zuverlässigkeit von BMA im Brandfall bekannt sein. Eine einheitliche Auswertung der zur Verfügung stehenden Daten zur Klärung dieser Fragestellung war jedoch

nicht möglich, da die verschiedenen Erhebungen unter sehr unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt wurden.

In [7.15] wurde in erster Linie die Häufigkeit von Fehlalarmen untersucht. Gegenstand der Erhebung in [7.16] war die Aussage, inwieweit BMA zur Reduzierung der Brandschäden gegenüber nicht brandmelderüberwachten Betrieben beigetragen haben. Hieraus kann jedoch nicht auf die Zuverlässigkeit der Anlage im Anforderungsfall geschlossen werden. Außerdem muss beachtet werden, dass die Daten der verschiedenen Statistiken zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben wurden (1960 bis 2000). Brandmeldeanlagen aus den 60er Jahren sind mit dem heutigen technischen Standard jedoch nicht vergleichbar.

Insgesamt wird auf Grundlage der zur Verfügung stehenden statistischen Daten von einer Versagenswahrscheinlichkeit der Komponente „automatische Brandmeldung“ von 0,079 ausgegangen.

7.2.3 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Brandmeldeanlagen

Die Möglichkeit der Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Brandmeldeanlagen lässt sich mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeitsberechnung untersuchen (vgl. Kapitel 10). Im Folgenden werden lediglich die in den bauaufsichtlichen Verordnungen und Richtlinien verankerten Regelungen zusammengefasst.

Es soll an dieser Stelle deutlich gemacht werden, dass in vielen Fällen die Kompensation einer baulichen Brandschutzmaßnahme nur durch ein Paket mehrerer anlagentechnischer Komponenten möglich ist. So sind z. B. Beherbergungsstätten nicht allein wegen des Vorhandenseins einer BMA mit mehr als 60 Betten zulässig, sondern es muss zusätzlich eine Brandfallsteuerung der Aufzüge vorgesehen werden.

Ähnlich verhält es sich mit vielen anderen Sonderbauten, bei denen eine Verbreiterung des Nutzungsbereiches zusätzliche Maßnahmen als Paket erfordert.

Beispielhaft soll die Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch BMA anhand der Muster-Industriebaurichtlinie verdeutlicht werden. Danach darf die zulässige Rettungsweglänge beim Vorhandensein einer BMA von 35 m bzw. 50 m auf maximal 50 m bzw. 70 m erhöht werden.

7.3 Löschanlagen

7.3.1 Arten und Einsatzfelder

Man unterscheidet folgende Typen von Sprinkleranlagen:

- Nassanlage
- Trockenanlage
- Nass-Trockenanlage
- Vorgesteuerte Anlage

- Tandemanlage

Tabelle 7.2 Sprinklertypen

Sprinklertyp	Montageart	Wasserverteilung	Schutzfläche	besonders geeignet für
Normalsprinkler	hängend und stehend	kugelförmig	9 - 21 m ²	
Schirmsprinkler	hängend und stehend	paraboloidförmig zum Boden gerichtet	9 - 21 m ²	
Flachschrimsprinkler	hängend und stehend	flach paraboloidförmig		Regalschutz Hohlraumschutz Rasterdecken
Seitenwandsprinkler		einseitig paraboloidförmig		geringe Raumhöhe
Horizontale Seitenwandsprinkler	horizontal	vergrößerte Wurfweite		Personenschutz Krankenhäuser Altenheime Pflegeheime
ESFR-Sprinkler				Lagergebäude

7.3.2 Projektierung von Löschanlagen

Die Auslegung einer Sprinkleranlage erfolgt grundsätzlich nach VdS CEA 4001 [7.20] und wird in sechs Schritten durchgeführt:

1. Festlegung der Brandgefahrenklasse
2. Festlegung von Wirkfläche und Wasserbeaufschlagung
3. Dimensionierung der Wasserversorgung
4. Bemessung der Energieversorgung
5. Bestimmung der Anlagenart
6. Auswahl von geeigneten Sprinklerköpfen

7.3.3 Zuverlässigkeit von Löschanlagen

Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Sprinkleranlagen wurden statistische Daten des VdS Schadenverhütung [7.18] ausgewertet. Die deutschen Zahlen wurden mit internationalen Erhebungen (z. B. Australien) verglichen. Zusätzlich wurden unabhängig voneinander erfragte Expertenaussagen herangezogen, z. B. vom Bundesverband Feuerlöschgeräte und Anlagen (BVFA).

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 Schwimmentile
 - 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 Schalterschränk
 - 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 Auftrage des europäischen Komitees der Versicherer (CEA) erstellten Sprinklerstatistik wurden 7.047 Fälle von Bränden und Leckagen aus ganz Europa ausgewertet. Der Zeitraum der Statistik erstreckt sich von 1985 bis 2002. Als Ergebnis der statistischen Auswertungen wurden die Ursachen des Versagens prozentual erfasst.

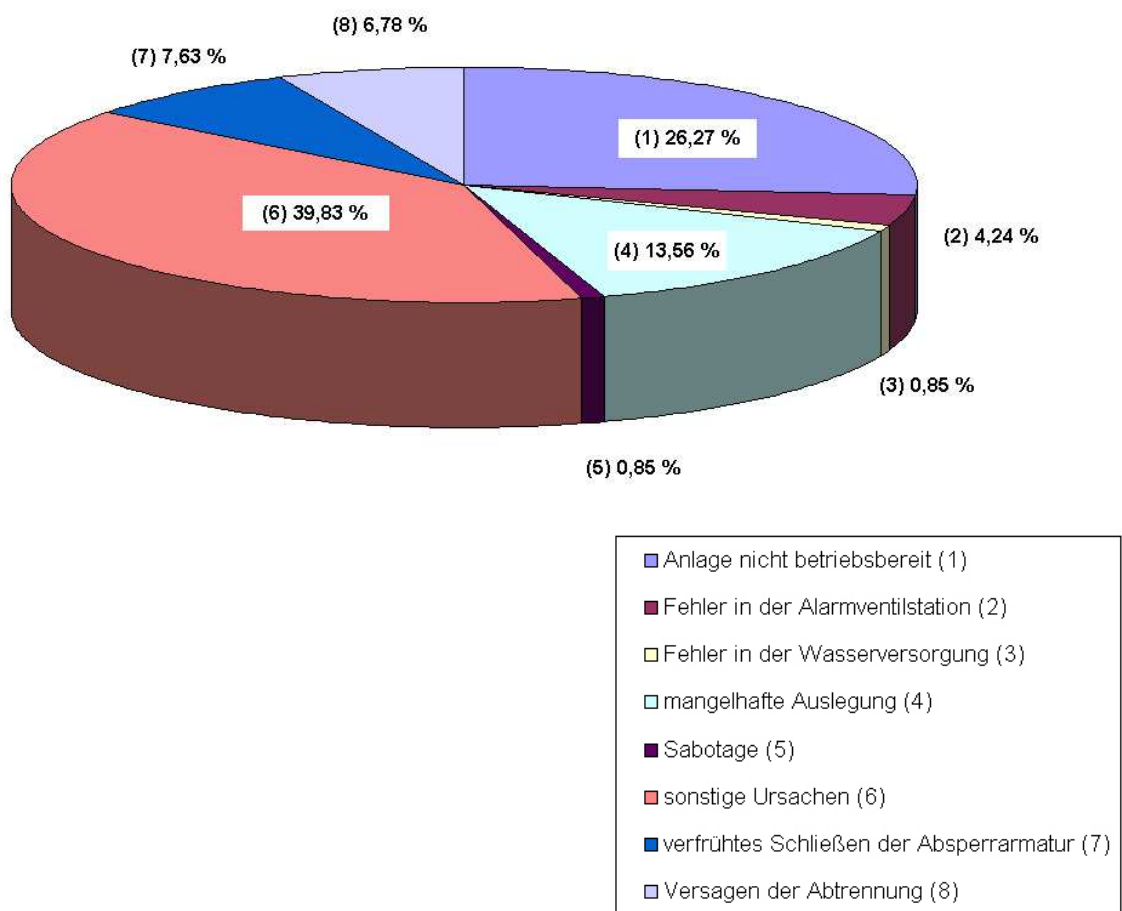


Bild 7.11 Prozentualer Anteil der Ursachen für das Versagen von Sprinkleranlagen

Die auf Grundlage der statistischen Auswertungen ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten der Komponente Löschanlage liegen eher auf der sicheren Seite. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Betriebe die Auslösung eines einzelnen Sprinklers (harmlose Kleinbrände a ohne nennenswerte Schäden) häufig nicht der Versicherung melden, um nicht Gefahr zu laufen, dass die Versicherungsprämie erhöht wird. Daher sind die durch Statistiken ermittelten Werte in der Regel ungünstiger als es der Realität entspricht.

Tabelle 7.3 Versagenswahrscheinlichkeit von Sprinkleranlagen aus verschiedenen Quellen

Quelle	Versagenswahrscheinlichkeit p pro Anforderung
VdS Schadenverhütung [7.18]	0,019
Australien [7.19]	0,041
Expertenaussagen BVFA	0,020

In Anbetracht dessen, dass die internationalen Standards bezüglich Errichtung und Wartung von Sprinkleranlagen in der Regel weniger streng sind als die Auflagen des VdS und da die auf Grundlage von Statistiken ermittelten Werte eher konservativ sind, wird eine Zuverlässigkeit von Sprinkleranlagen von 98 % pro Anforderung angenommen.

7.3.4 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Sprinkler

Die Möglichkeit der Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Sprinkleranlagen lässt sich im Einzelfall mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeitsberechnung untersuchen (siehe Kapitel 10), bei der die individuellen Randbedingungen detailliert berücksichtigt werden können [7.7].

Darüber hinaus existiert ein semi-probabilistisches vereinfachtes Verfahren [7.7], [7.8], bei dem die Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch Anlagentechnik über die Betrachtung des Naturbrandszenarios berücksichtigt wird, welches sich bei Annahme der Funktion der betreffenden anlagentechnischen Maßnahme ergeben würde. Die individuell vorhandene Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlagentechnik, die Streuungen der beim Nachweis verwendeten Modellvariablen und die Unsicherheiten des Rechenmodells werden durch probabilistisch hergeleitetete Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt. In Anhang A2.7.2 wird ein Rechenbeispiel für die Kompensation einer Brandschutzbekleidung durch eine Sprinkleranlage gegeben. Das semi-probabilistische Verfahren wird in Kapitel 10 erläutert.

Im Folgenden werden beispielhaft einige in den Muster-Verordnungen für Sonderbauten verankerte Regelungen zur Herabsetzung bestimmter Anforderung bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage angeführt.

- Ohne Sprinklerschutz müssen tragende Wände, Pfeiler und Stützen bei erdgeschossigen Verkaufsstätten feuerhemmend ausgeführt werden, während bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage keine Anforderungen an das Tragwerk bestehen.
- Das Dachtragwerk mehrgeschossiger Versammlungsstätten muss ohne Sprinklerung feuerbeständig ausgeführt werden, während bei Vorhaltung einer Sprinkleranlage keine Anforderungen an den Feuerwiderstand des Dachtragwerks bestehen.

- Die Rauchabschnittsgröße von ungesprinkelten 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:

- Ermöglichung der sicheren Benutzbarkeit von Fluchtwegen durch die Nutzer, indem dort eine ausreichend dicke raucharme Schicht geschaffen wird
- Erleichterung einer wirkungsvollen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr, indem die Sichtung des Brandherdes verbessert wird
- Gewährleistung der Rettung von Personen ohne starke Behinderung durch Rauch- und Brandgase
- Verhinderung bzw. Verzögerung des Flash-over
- Verringerung von Brandfolgeschäden durch Rauch- und Brandgase (Schutz von Sachwerten)
- Verminderung der thermischen Beanspruchung von Bauteilen durch Abfuhr der Brandwärme

Die erforderliche Öffnungsfläche von Rauchabzügen hängt von folgenden Randbedingungen ab:

- Nutzung des Gebäudes (erforderliche Höhe der raucharmen Schicht)
- erwartete Brandentwicklungsdauer
- Deckenhöhe
- Höhe der Rauchschrägen
- Fläche des Rauchabschnitts

7.4.2 Zuverlässigkeit von RWA

Tabelle 7.4 Zuverlässigkeit der manuellen Öffnung von Rauch- und Wärmeabzügen

	angenommener Wert	Quelle
Versagenswahrscheinlichkeit manuelle Auslösung von RWA (Personal dauernd anwesend)	0,1	[7.5]
Versagenswahrscheinlichkeit manuelle Auslösung von RWA (Personal überwiegende Zeit anwesend)	0,8	[7.5]
Versagenswahrscheinlichkeit manuelle Auslösung von RWA (Personal 1/3 der Zeit anwesend)	0,99	[7.5]
Versagenswahrscheinlichkeit manuelle Auslösung von RWA (Personal selten anwesend)	1	[7.5]

7.4.3 Kompensation baulicher Brandschutzmaßnahmen durch RWA

Die Möglichkeit der Kompensation bauaufsichtlicher Anforderungen durch Rauch- und Wärmeabzugsanlagen lässt sich mit einer zeitabhängigen Systemzuverlässigkeitsberechnung untersuchen (vgl. Kapitel 10) Im Folgenden werden lediglich die in den bauaufsichtlichen Verordnungen und Richtlinien verankerten Regelungen zur Herabsetzung bestimmter Anforderung bei Vorhandensein von Rauch- und Wärmeabzügen zusammengefasst.

Im Folgenden werden beispielhaft einige in den Muster-Verordnungen für Sonderbauten verankerten Regelungen zur Herabsetzung bestimmter Anforderung bei Vorhandensein von RWA zusammengefasst.

- Bei Vorhandensein von RWA in der Ladenstraße von Verkaufsstätten darf (bei gesprinklerten Verkaufsstätten) der Rettungsweg auf der Ladenstraße 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, wenn die RWA-Fläche groß genug ist.

7.5 Abwehrender Brandschutz

7.5.1 Alarmierungszeit

Um die Wirkung der Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr auf das Brandszenario quantifizieren zu können, muss u. a. der Zeitpunkt des Beginns der Brandbekämpfung ab Brandausbruch bekannt sein.

Die Zeitdauer von der Entzündung bis zum Beginn der Löscharbeiten wird als *Brandentwicklungsdauer* bezeichnet. Sie setzt sich zusammen aus der *Alarmierungszeit* und der *Hilfsfrist*. Zwischen der Alarmierung der Feuerwache und dem Aufbruch der Löschfahrzeuge von der Wache liegt die sogenannte *Ausrückzeit* (ca. 2 Minuten), die der Hilfsfrist zugeordnet wird.

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. Je nach geometrischen Randbedingungen, Ansprechempfindlichkeit der Melder und Brandszenario kann im Mittel von einer Alarmierungszeit von 1,5 Minuten ausgegangen werden (Fall 1, Tabelle 7.5). Die ständige Präsenz von Personen im betrachteten Brandabschnitt kann in der Wirkungsweise einer automatischen Brandmeldeanlage gleichgesetzt werden (Fall 2, Tabelle 7.5).

Zahlreichen Studien zufolge kann bei überwiegender Anwesenheit von Personen im betrachteten Brandabschnitt im Regelfall davon ausgegangen werden, dass die Brandentdeckung erst nach mind. 2 Minuten erfolgt und nach weiteren 1,5 Minuten die Meldung des Brandes erfolgt. Die Notrufabfrage ist nach weiteren 1,5 Minuten abgeschlossen. Bis zur Alarmierung der Feuerwehren sind demnach im Mittel mindestens 5 Minuten vergangen (Fall 4, Tabelle 7.5). Es soll an dieser Stelle angemerkt werden, dass diese Zeiten lediglich für Industriebauten Gültigkeit haben, welche die Anforderungen bezüglich der Zufahrt- und Zugangsmöglichkeiten sowie der Aufstell- und Bewegungsflächen für die Feuerwehr erfüllen.

Tabelle 7.5 Alarmierungszeiten in Abhängigkeit von den Bedingungen für die Brandmeldung (für den Industriebau)

Fall	Bedingungen für die Brandmeldung	Alarmierungszeit [min]
1	automatische BMA	1,5
2	ständig Personen anwesend (z. B. 3-Schicht-Betrieb)	1,5
3	quasi-ständig Personen anwesend (z. B. Eingangshallen, Bahnhöfe etc.)	≈ 3,5
4	die überwiegende Zeit Personen anwesend (> 50 % der Zeit)	> 5
5	selten oder nie Personen anwesend	keine pauschale Aussage

7.5.2 Hilfsfrist

Die Hilfsfrist bezeichnet die Zeitspanne zwischen der Alarmierung der Feuerwehr und dem Beginn der Löscharbeiten. Sie hängt in erster Linie ab von:

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

- der Entfernung des Brandortes von der Feuerwache
- der durchschnittlichen Verkehrsdichte auf der Anfahrsstrecke und besondere Zeitverzögerungspunkte (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)
- dem Ausbildungsstand der Feuerwehrleute
- der Zugänglichkeit des Objektes

Der Ausbildungsstand der Feuerwehrleute kann vereinfacht als bundesweit einheitlich angenommen werden. Die Zugänglichkeit ist bauordnungsrechtlich 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 damit der Zeitbedarf für die Wegstrecke zwischen Feuerwache und Brandort, der von den beiden erstgenannten Punkten abhängt, der Wegstrecke und der Verkehrsdichte.

Durch eine statistische Auswertung von Feuerwehrereinsatzdatenblätter wurden p-Quantile der Zeitspanne zwischen Alarmierung und Beginn der Löschmaßnahmen in Abhängigkeit der effektiven Entfernung zwischen Feuerwache und Brandort ermittelt, um somit die Hilfsfrist quantifizieren zu können [7.4]. Die Ergebnisse können in Bild 7.13 abgelesen werden.

Je nachdem, welche Randbedingungen bezüglich der Brandmeldung vorliegen, kann die Brandentwicklungsdauer 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.

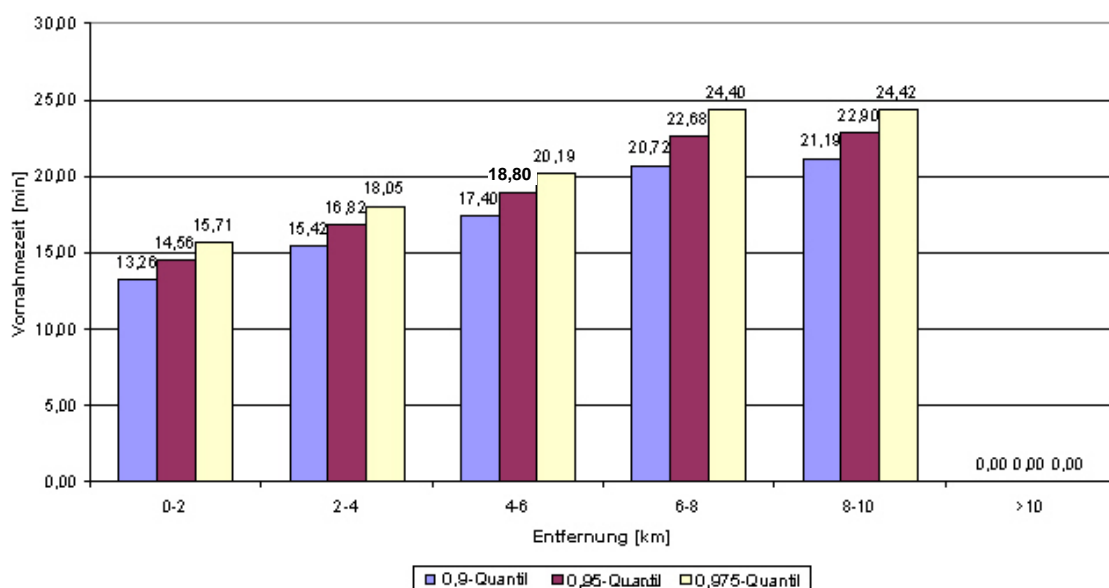


Bild 7.13 Quantile der Hilfsfristen (Vornahmezeit) in Abhängigkeit der Entfernung von der Feuerwache zum Brandort

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.

Es existieren Grenzwerte für die von einer durchschnittlichen anerkannten Werkfeuerwehr, Betriebspersonal und der öffentlichen Feuerwehr bei normalen Bedingungen jeweils maximal löschraren Brandflächen, die auf Grundlage von Expertenaussagen und Angaben in [7.2, 7.6] zusammengestellt wurden. Das nachfolgende Diagramm gibt Aufschluss über die Erfolgswahrscheinlichkeit der Löschrmaßnahmen in Abhängigkeit von der Brandfläche.

Ist die unter Annahme einer bestimmten Brandausbreitungsgeschwindigkeit errechnete Brandfläche bei Beginn der Löschrarbeiten größer als das 0,05-Quantil der von der Feuerwehr löschraren Brandfläche, muss durch entsprechende Maßnahmen sichergestellt werden, dass die Brandbekämpfung zu einem früheren Zeitpunkt stattfindet (automatische Brandmeldung, verbesserte Zugänglichkeit etc). Alternativ können anlagentechnische Einrichtungen installiert werden, z. B. automatische Löschranlagen.

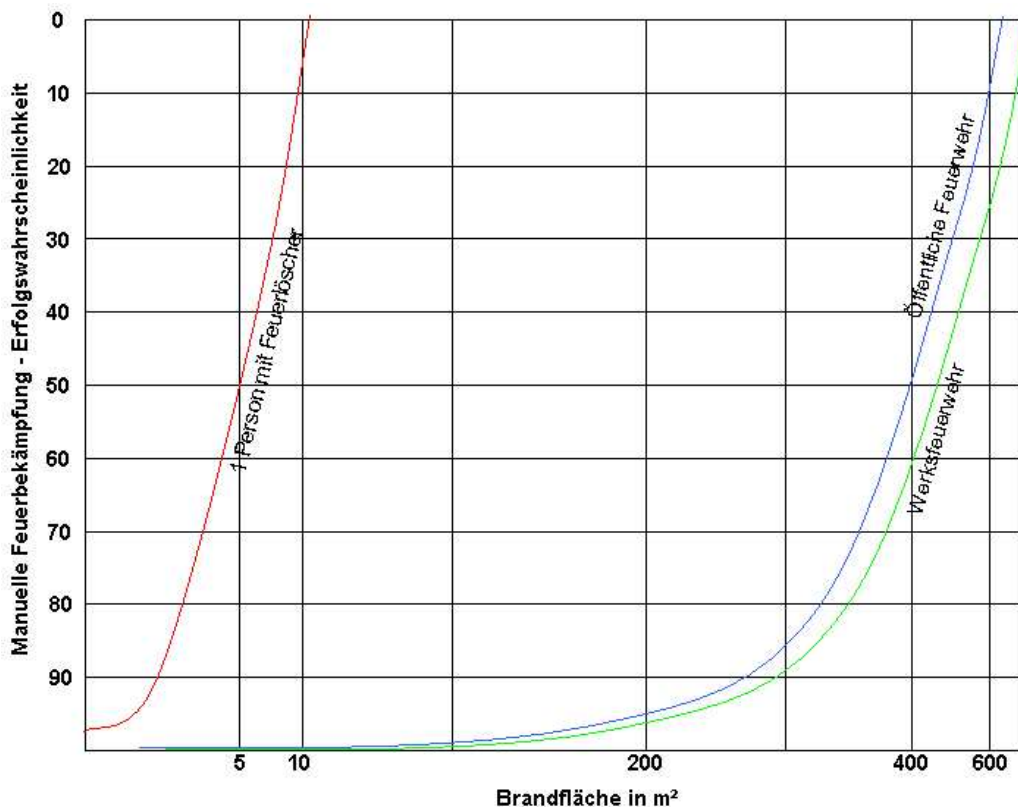


Bild 7.14 Erfolgswahrscheinlichkeit [%] von Löschrmaßnahmen in Abhängigkeit von der Brandfläche

7.6 Literatur

- [7.1] VFDB: Risikoangepasste Reaktion der Feuerwehren auf automatische Meldungen aus Brandmelde- und Sprinkleranlagen. Entwurf einer vfdb-Richtlinie, Fassung März 2002.

- [7.2] *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.
- [7.3] *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.
- [7.4] *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] *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.
- [7.6] Fire Engineering Guidelines. Australian Building Codes Board (ABCB), Australian Fire Authorities Council (AFAC), The Institution of Engineers, Australia (IEAust), 1996.
- [7.7] *DEHNE, M.*: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig, Heft 169 (2003).
- [7.8] *DEHNE, M.; VAN LIER, M.*: Zusammenwirken von baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen. vfdb-Jahresfachtagung 2004, Essen, 2004.
- [7.9] DIN V ENV 1993-1-2. Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln; Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung, Ausgabe Mai 1997.
- [7.10] *PROMAT GMBH*: Promat-Handbuch. Bautechnischer Brandschutz A1, Ratingen, November 2001.
- [7.11] National Institute of Standards and Technology: Technical Reference Guide for FPE-tool, Version 3.2. Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland, Draft April 1995.
- [7.12] National Institute of Standards and Technology: An Algorithm for Estimating the Plume Centerline Temperature in the Presence of a Hot Upper Layer, Gaithersburg, Maryland, June 1998.
- [7.13] *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.
- [7.14] *REINTSEMA, J.*: Brandschutz im Krankenhaus. Dissertation, Medizinische Hochschule Hannover, 2000.

- [7.15] Vereinigung Kantonalen Versicherungen: Alarmstatistik BMA. Übersicht der echten und unechten Alarme. Bern. Auswertung 1996 - 2000, Bern, Ausgabe Dezember 2001
- [7.16] *CERBERUS AG*: Bewährung der Cerberus-Brandmeldeanlagen. Broschüre der Cerberus AG. Werk für Elektronentechnik, Männedorf, Schweiz, 1960 - 1967.
- [7.17] VdS Schadenverhütung: Jahresbericht 1979, Köln, 1979.
- [7.18] VdS Schadenverhütung: Jahresbericht 1990 / 91, Köln, 1991.
- [7.19] *NASH, P.; YOUNG, R. A.*: Automatic Sprinkler Systems For Fire Protection. 2nd Edition, Paramount Publishing, 1991.
- [7.20] VdS CEA 4001: Richtlinien für Sprinkleranlagen. Planung und Einbau.

ANHANG ZU KAPITEL 7

Tabelle A7.1 Eigenschaften gebräuchlicher automatischer Meldertypen

Meldertyp	geeignet z. B.	nicht geeignet z. B.	anfällig gegenüber
Rauchmelder	<ul style="list-style-type: none"> • bei dichtem, sichtbarem Rauch • bei Kabelbränden 	<ul style="list-style-type: none"> • für Brände ohne nennenswerte Rauchentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • Erschütterungen • starke Lichtquellen • Schmutz • Insekten • Kondensation
Ionisationsrauchmelder	<ul style="list-style-type: none"> • bei Rauch mit kleiner Partikelgröße (rasch verlaufende Brände) 	<ul style="list-style-type: none"> • weniger geeignet für Schwelbrände 	<ul style="list-style-type: none"> • Auftreten von Wasserdampf • betriebsbedingte Rauchentwicklung (Fehlalarme)
optische Rauchmelder	<ul style="list-style-type: none"> • bei Schwelbrände • bei Rauch mit größerer Partikelgröße 	<ul style="list-style-type: none"> • weniger geeignet für Rauch mit kleiner Partikelgröße 	<ul style="list-style-type: none"> • siehe Ionisationsrauchmelder
Ansaugrauchmelder	<ul style="list-style-type: none"> • wenn Punktmelder nur mit großem Aufwand eingesetzt werden können • Hohlböden • Kabeltunnel • Hochregallager • Tiefkühlager 		<ul style="list-style-type: none"> • betriebsbedingte Rauchentwicklung • Denkmalschutz
Lichtstrahlrauchmelder	<ul style="list-style-type: none"> • bei großflächigen Räumen • bei hohen Räumen • Korridore, Empfangshallen, Atrien, Lagerhallen, denkmalgeschützte Gebäude 	<ul style="list-style-type: none"> • für kleine Brände 	<ul style="list-style-type: none"> • Abgase, Zigarettenrauch (Fehlalarme)

Fortsetzung Tabelle A7.1

Meldertyp	geeignet z. B.	nicht geeignet z. B.	anfällig gegenüber
Wärmemelder	<ul style="list-style-type: none"> • für Fertigungsbereiche • bei feuchtem Klima, hoher Luftfeuchtigkeit • bei starker Schmutz- oder Staubentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • für Schlafräume • bei hohen Decken für Schwelbrände 	<ul style="list-style-type: none"> • Erschütterungen • Korrosion
Differentialwärmemelder	<ul style="list-style-type: none"> • bei betriebsbedingt größeren Rauch- und Staubmengen • bei offenen Bränden mit starker Wärmeentwicklung • bei niedrigen Umgebungstemperaturen • bei geringen Temperaturschwankungen 	<ul style="list-style-type: none"> • s. o. • starke Temperaturschwankungen 	
Wärmaximalmelder	<ul style="list-style-type: none"> • bei betriebsbedingt größeren Rauch- und Staubmengen • bei offenen Bränden mit starker Wärmeentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • bei betriebsbedingt hohen Temperaturen 	
Lineare Wärmemelder	<ul style="list-style-type: none"> • bei extremen äußeren Bedingungen • Feuchtigkeit • Staub • Schnee • elektromagnetische Störstrahlung 		<ul style="list-style-type: none"> • s. o.

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

Fortsetzung Tabelle A7.1

Meldertyp	geeignet z. B.	nicht geeignet z. B.	anfällig gegenüber
Flammenmelder	<ul style="list-style-type: none"> • für allgemeinen Gebrauch • bei Bränden mit offener Flamme 	<ul style="list-style-type: none"> • für Schwelbrände 	<ul style="list-style-type: none"> • Windböen • Kochdämpfe • Staub • Insekten • Schmutz • Zigarettenrauch
UV-Flammenmelder	<ul style="list-style-type: none"> • Brände ohne viel Rauchentwicklung • hohe Hallen mit brennbaren Flüssigkeiten • Einsatz im Freien 	<ul style="list-style-type: none"> • s. o. 	<ul style="list-style-type: none"> • s. o.
Infrarot-Flammenmelder	<ul style="list-style-type: none"> • große, offene Bereiche • Lagerhäuser • Holzlagerplätze • Einsatz im Freien 	<ul style="list-style-type: none"> • s. o. 	<ul style="list-style-type: none"> • s. o.
Mehrsensormelder	<ul style="list-style-type: none"> • für alle Brände geeignet 		
Gasmelder	<ul style="list-style-type: none"> • für Schwelbrände • zur Minimierung von Fehlalarmen 	<ul style="list-style-type: none"> • für Flammenbrände • bei hoher Feuchtigkeit • bei hohen Temperaturen 	

8 PERSONENSICHERHEIT IN RETTUNGSWEGEN

8.1 Optische Rauchdichte

Bei der Bewertung der von einem Brand ausgehenden Gefahren spielt das Ausmaß der Verqualmung und die damit einhergehende Reduktion der Sichtweite 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. Dabei wird der heiße Brandrauch durch Einmischung von Luft verdünnt und abgekühlt, wobei er an Volumen zunimmt. Es bilden sich so die von Brandereignissen bekannten Phänomene wie Plume, ausgedehnte Rauchwalzen und lokale Wirbel.

Die lichtrübende Wirkung des Rauches wird durch die optische Dichte pro Weglänge D_L oder den Extinktionskoeffizienten K quantifiziert. Beide Größen beschreiben den gleichen physikalischen Sachverhalt, unterscheiden sich jedoch in ihrer mathematischen Formulierung, 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.

Für die Anwendung in Nachweisverfahren besonders wichtig ist der Zusammenhang zwischen optischer Rauchdichte und Massenkonzentration des Rauches (Rauchpartikel-Beladung),

$$D_L = \frac{D_m}{Y_{\text{Rauch}}} \cdot C_{\text{Rauch}} \quad (8.2)$$

Die Größe D_m wird meist als Rauchpotential (bezogen auf die optische Dichte pro Weglänge) bezeichnet (englisch: mass optical density). Standard optische Dichte oder Verqualmungspotential sind weitere gebräuchliche Bezeichnungen. Y_{Rauch} ist der Rauchpartikel-Entstehungsanteil am Brandgut (Rauchausbeute, englisch: *smoke yield* oder *smoke mass conversion factor*). Als Anteil an der gesamten durch Verbrennung freigesetzten Masse ist die Ausbeute Y eine dimensionslose Größe, manchmal auch in der Form (g/g) angegeben. Auch für das Rauchpotential gilt

$$D_m = \frac{K_m}{\ln(10)} \approx 0,43 \cdot K_m \quad (8.3)$$

K_m ist dabei das Rauchpotential, bezogen auf den Extinktionskoeffizienten K . Weiterhin gibt es noch den Begriff der spezifischen Absorptionsfläche $K_s = K_m / Y_{\text{Rauch}}$. Diese Größe hat

dieselben physikalischen Einheiten (m^2/g) wie das Rauchpotential. Der Vorteil bei der Verwendung des Rauchpotentials gegenüber der spezifischen Absorptionsfläche liegt darin, dass in D_m die Abhängigkeit der Rauchproduktion vom Brandstoff deutlicher zum Ausdruck kommt. Weiterhin hängt das Rauchpotential 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 Sichtweite

Die Sichtweite 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. Dennoch zeigt die Auswertung von Rauchversuchen, dass ein im Wesentlichen reziproker Zusammenhang zwischen Rauchdichte und Sichtweite 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 Sichtweitenbereich zwischen 5 m und 15 m. Die Ausgleichskurven lassen sich jedoch auch hin zu höheren [8.2] und niedrigeren [8.4] Sichtweiten – bis auf etwa 0,5 m (Armeslänge) – extrapolieren. 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 Sichtweite und optischer Rauchdichte für unterschiedliche Rauchzusammensetzungen. Dabei wurde in (8.4) und (8.5) für die Proportionalitätskonstante C der jeweilige Mittelwert eingesetzt und der Extinktionskoeffizient K in die optische Rauchdichte 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 Sichtweite führen. Bereits in den sechziger Jahren wurde von Prof. Rasbash auf der Basis eigener und fremder Untersuchungen eine ähnliche Korrelation zwischen Sichtweite und optischer Dichte ermittelt [8.6], die nahe bei der von Jin für lichtreflektierende Zeichen ermittelten Beziehung liegt.

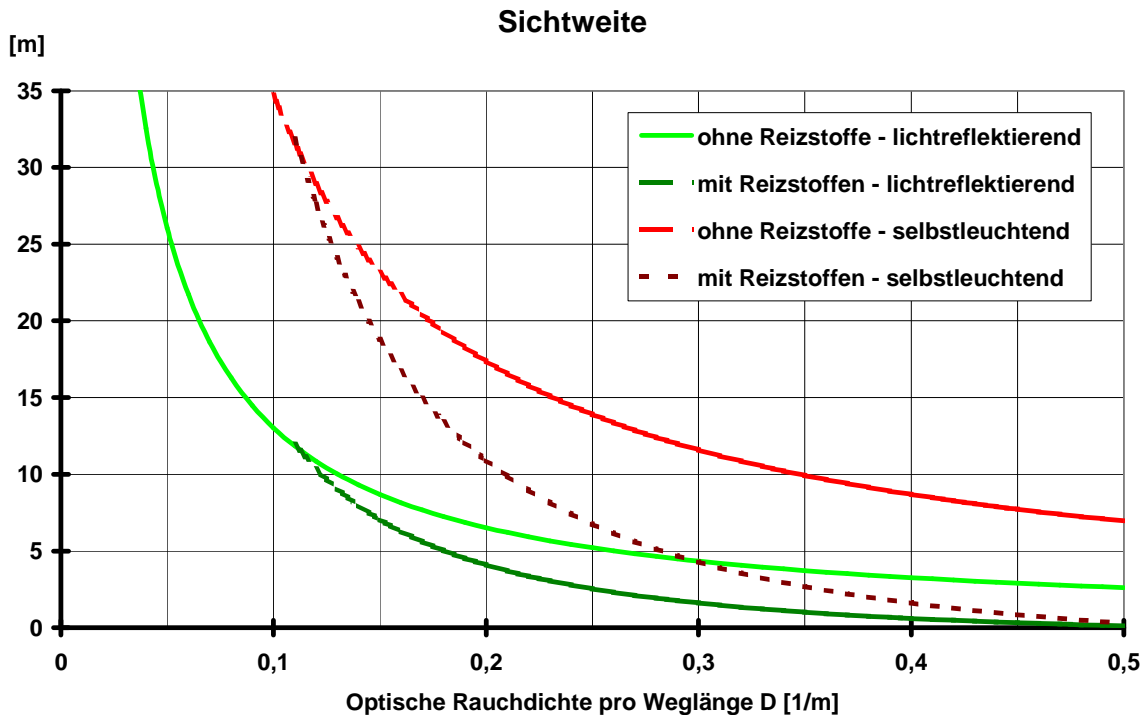


Bild 8.1 Sichtweite S als Funktion der optischen Dichte D_L

Zwei für die Selbstrettung wichtige Auswirkungen einer durch Rauchbildung reduzierten Sichtweite 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].

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, inklusive 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 die direkte toxische Reaktion oder durch Hitzeeinwirkung) führen kann. Die häufigsten bei Brandopfern festgestellten narkotisierenden Gase sind Kohlenmonoxid (CO), Cyanwasserstoff (HCN) sowie Kohlendioxid (CO₂) [8.10, 8.11].

Ein für quantitative Sicherheitsbetrachtungen geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Expositionsdauer bis zum Eintreten von Handlungsunfähigkeit ist die „Fractional Effective Dose“ (FED) - Methode [8.4, 8.10, 8.12]. Dabei wird der Quotient F aus der während eines vorgegebenen Zeitintervalls 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

8 Personensicherheit in Rettungswegen

Handlungsunfähigkeit ergibt sich dann aus der Summe dieser Zeitintervalle. F hängt von den entsprechenden Quotienten F_j der einzelnen Komponenten CO, HCN, CO₂ sowie O₂ (Sauerstoffmangel) ab:

$$F_{\text{CO}} = \frac{3,317 \cdot 10^{-5} \cdot \text{RMV} \cdot c_{\text{CO}}^{1,036} \cdot \Delta t}{D} \quad (8.6)$$

$$F_{\text{HCN}} = \frac{\Delta t}{\exp(5,396 - 0,023 \cdot c_{\text{HCN}})} \quad (8.7)$$

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta t}{\exp(6,1623 - 0,5189 \cdot c_{\text{CO}_2})} \quad (8.8)$$

$$F_{\text{O}_2} = \frac{\Delta t}{\exp(8,13 - 0,54 \cdot (20,9 - c_{\text{O}_2}))} \quad (8.9)$$

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. Es ist zu beachten, dass diese Relationen für kurzzeitige starke Belastungen (Dauer bis zu maximal etwa einer Stunde) entwickelt wurden und daher nicht bei mehrstündigen Expositionszeiten angewandt werden sollten. 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 $\text{RMV} = 25$ l/min. Für einen Erwachsenen in Ruhe erhält man $D = 40 \%$ und $\text{RMV} = 8,5$ l/min. Tod tritt bei $D \approx 50 \%$ ein. Für kleinere Kinder ergeben sich Zeiten bis zum Eintreten der Bewegungsunfähigkeit, die etwa um einen Faktor 2 kürzer sind als diejenigen für Erwachsene [8.10].

Die F_j der Relationen (8.6) bis (8.9) 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 CO₂ 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 :

$$F = \max \left((F_{\text{CO}} + F_{\text{HCN}} + F_{\text{Irr}}^{\text{LD}}) \cdot V_{\text{Hyp}} + F_{\text{O}_2}, F_{\text{CO}_2} \right), \quad (8.10)$$

mit

$$V_{\text{Hyp}} = \exp(0,2 \cdot c_{\text{CO}_2}). \quad (8.11)$$

In [8.4] wird die Anwendung von (8.10) 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 (8.11) ist laut [8.4] ab einer CO₂-Konzentration von 2 Volumenprozent in die Berechnung mit einzubeziehen.

Es ist zu beachten, dass toxische Auswirkungen, insbesondere die des Sauerstoffmangels und des Kohlendioxids, nicht nur dosis-, sondern auch konzentrationsabhängig sind [8.10]. Für die Festlegung von Akzeptanzwerten sind u. U. auch Langzeitwirkungen zu berücksichtigen [8.13].

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 Sichtweite (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 nicht verfügbar sind, ist eine rechnerische Bewertung der Reizgaswirkung mit Hilfe von Ingenieurmethoden zur Zeit 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 ingenieurgemäßen Nachweises in der Regel davon ausgegangen werden, dass die Rauchgasbestandteile (insbesondere auch die Reizgase) für eine erfolgreiche Selbstrettung unbedenklich sind [8.7, 8.9, 8.19].

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: Hitzeschock, Hautverbrennungen und Verbrennungen des Atmungsapparats. Übersichtsartikel dazu findet man z. B. in [8.10, 8.15, 8.16].

Man unterscheidet zwischen

- direkter kurzzeitiger Heißgaseinwirkung auf den Atemapparat (Inhalationsschick)
- Verbrennung durch Heißgase und
- der Strahlungswirkung auf den Menschen.

8 Personensicherheit in Rettungswegen

Verbrennungen 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 für das Auftreten von Verbrennungen 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 Hitzeschock ist ein Anstieg der Körperwärme, wobei Werte über 40 °C Körpertemperatur zu Bewusstseinsbeeinträchtigungen und körperlichen Schäden, Körpertemperaturen über 42,5 °C unbehandelt innerhalb weniger Minuten sogar zum Tode führen können.

Hautverbrennungen hängen von dem die Hautoberfläche erreichenden Wärmestrom ab und sind weitgehend unabhängig vom Mechanismus der Wärmeübertragung. Für den Fall der Selbstrettung besonders wichtig sind Konvektion und Wärmestrahlung. Neben der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer spielen hier die Luftströmung sowie die Art der Bekleidung eine wesentliche Rolle. Während im Bereich der Grenztemperatur zwischen Hitzeschock und Verbrennungen die Toleranzzeit bei 15 - 25 Minuten liegt, sinkt diese bei Temperaturen von ca. 200 °C (trockene Luft) auf 3 - 4 Minuten. Bei Wärmestrahlung liegt die Erträglichkeitsschwelle bei etwa 2,5 kW/m². Neben dem unmittelbar durch die Verbrennungen hervorgerufenen Schmerz können Verbrennungen der Hautoberfläche auch zu einem Schockzustand führen, der durch den Verlust an Körperflüssigkeit verursacht wird. Es kommt so zu einem Kreislaufversagen bis hin zum Kollaps oder Bewusstlosigkeit.

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 200 °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 Hitzeeinwirkung 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 Bewusstseinsstrübung führt. Auf dieser Basis wurde die folgende Relation zur Bestimmung der Zeit τ für das Erreichen von Handlungsunfähigkeit durch konvektiver Wärmeübertrag bei mittlerer Luftfeuchte bestimmt,

$$\tau \text{ [min]} = \frac{5 \cdot 10^7}{(T[^\circ\text{C}])^{3,4}} \quad (8.12)$$

Für Handlungsunfähigkeit durch Hitzeschock findet man in [8.16]

$$\tau \text{ [min]} = \frac{4,1 \cdot 10^8}{(T[^\circ\text{C}])^{3,61}} \quad (8.13)$$

Eine ähnliche Relation ist in [8.15] angegeben.

Insbesondere für die nähere Umgebung von großen Flammen und unterhalb von Heißgas-schichten lassen sich auch kritische Bestrahlungsstärken q angeben. Unterhalb eines Schwellenwertes von $2,5 \text{ kW/m}^2$ 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 8.2 Grenzen der Erträglichkeit von Wärmestrahlung und Konvektion [8.18]

Einwirkung	Intensität bzw. Temperatur	erträgliche Einwirkzeit
Wärmestrahlung	10 kW/m^2	Schmerz nach 4 s
(Einwirkung auf Haut)	4 kW/m^2	Schmerz nach 10 - 20 s
	$2,5 \text{ kW/m}^2$	Schmerz nach 30 s
Konvektion	$< 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (bei H_2O -Sättigung)	$> 30 \text{ min}$
(Atemwege, Haut)	$160 \text{ }^\circ\text{C}$ ($< 10 \%$ H_2O)	2 min
	$120 \text{ }^\circ\text{C}$ ($< 10 \%$ H_2O)	7 min
	$100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($< 10 \%$ H_2O)	12 min

Für die kombinierte Wirkung von Wärmestrahlung und Konvektion lässt sich ebenfalls ein von der Expositionsdauer abhängiges Modell angeben [8.4, 8.10]

$$\text{FED}_{\text{thermisch}} = \sum \left(\frac{\Delta t}{\tau_{\text{conv}}} + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{rad}}} \right) \quad (8.14)$$

mit τ_{conv} aus Gleichung (8.12) und $\tau_{\text{rad}} = 1,33 \cdot q^{-1,33}$ bzw. $\tau_{\text{rad}} = 4 \cdot q^{-1,35}$ für $q > 2,5 \text{ kW/m}^2$. Bei $\text{FED}_{\text{thermisch}} = 1$ ist die Grenze der Handlungsfähigkeit erreicht.

8.5 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 Draft Technical Specification ISO TDS 13571 Life threat from fires – Guidance on the estimation of time available for escape using fire data, Stand 19.09.2001.
- [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.*: Bericht über Untersuchungen zur Bestimmung der Sichtweite und zu Brandgaswirkungen auf den Menschen, Brandschutz Consult Leipzig, 2003.
- [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.

- [8.14] 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.; LESSING, R.*: Untersuchungen bei Brandverletzten und Brandtoten, Brandschutz Consult Leipzig, 1997.
- [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.

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 erforderliche Zeitspanne (erforderliche Fluchtzeit) kleiner ist als die Zeitspanne, innerhalb derer die Belastung durch Rauch- und Wärmeausbreitung innerhalb akzeptabler Grenzen bleibt (verfügbare Fluchtzeit). 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 (Zeit für die Entfluchtung) $t_{\text{Räumung}}$ kleiner sein muss als die verfügbare Fluchtzeit $t_{\text{verfügbar}}$.

$$t_{\text{Räumung}} < t_{\text{verfügbar}} \quad (9.1)$$

Dabei ist darauf zu achten, dass durch die Wahl geeigneter Brandszenarien und Akzeptanzkriterien in $t_{\text{verfügbar}}$ implizit ein ausreichender Sicherheitsfaktor enthalten ist. Andernfalls (z. B. bei der Bestimmung von $t_{\text{verfügbar}}$ auf der Basis von Erträglichkeitsgrenzen) muss ein entsprechender Sicherheitsfaktor zusätzlich berücksichtigt werden. Explizite Sicherheitszuschläge auf $t_{\text{Räumung}}$ 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 $t_{\text{Räumung}}$ setzt sich zusammen aus der Zeitspanne $t_{\text{Detektion}}$ vom Beginn des Brandes (in der Regel der Zeitpunkt Null eines zeitabhängigen Bemessungsbrandes) bis zur Detektion des Brandes, der Zeitspanne t_{Alarm} von Detektion bis zum Auslösen des Alarms, einer Reaktionszeit t_{Reaktion} vom Auslösen des Alarms bis zum Beginn der Fluchtbewegung und der Zeit t_{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.

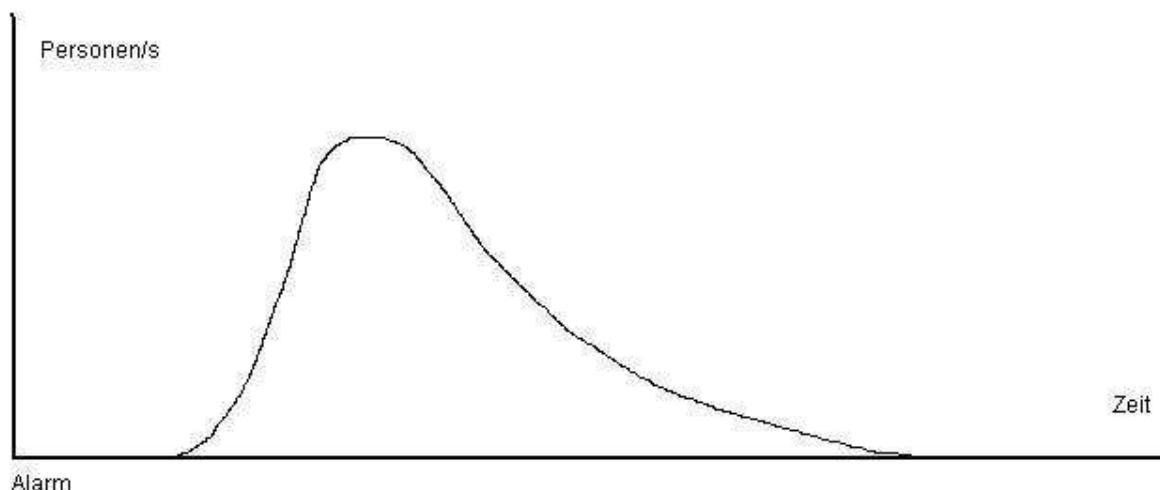


Bild 9.1 Schematische Darstellung einer typischen Reaktionszeit-Verteilung

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 Fluchtbewegung 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

9 Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren

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	zweistufiges automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung einer Zentrale und nachgeschalteter zeitverzögerter Alarmierung der betroffenen Bereiche
A3	keine oder nur lokale automatische Brandmeldung

Tabelle 9.3 Gebäudekomplexität

B1	einfache, überwiegend rechtwinklige Struktur, eingeschossig, nur wenige Räume bzw. Unterteilungen, einfacher Grundriss mit Ausgängen in Sichtlinie, kurze Wegstrecken, geeignete Vorkehrungen für direkt ins Freie führende Ausgänge (z. B. ein einfach strukturierter Supermarkt)
B2	einfacher Grundriss mit mehreren Räumen (auch mehrgeschossig), Bauweise entspricht überwiegend präskriptiven Vorgaben (z. B. einfaches Bürogebäude)
B3	großes, komplexes Gebäude

Tabelle 9.4 Brandschutzmanagement

M1	Personal bzw. ständige Gebäudenutzer sind in den Belangen des Brandschutzes gut ausgebildet. Es gibt Brandschutzhelfer, 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

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		

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 Zeitanangaben der Tabelle 9.5 stand nur Datenmaterial in vergleichsweise geringem Umfang zur Verfügung, so dass diese Daten mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind.

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 ausbildendem 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 entwickelt, welche die Bewegung einzelner Personen in einer möglichst realitätsnahen Umgebung simulieren und die sich zwischenzeitlich auch in der Anwendungspraxis bewährt haben.

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 aufwändigere 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, Terrorattaken) 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.

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.

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

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,

$$t_{\text{Weg}} = \frac{L_{\text{max}}}{V} . \quad (9.4)$$

Bei der Passagezeit ist neben der Breite B des Wegelements 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,

$$t_{\text{Passage}} = \frac{L_{\text{min}}}{V} + \frac{N}{F_s \cdot B} . \quad (9.5)$$

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 Be-

grenzungen 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, ähnliche 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 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],

$$S = k - a \cdot k \cdot D. \quad (9.6)$$

Den spezifischen Personenstrom F_s erhält man durch Multiplikation von Geschwindigkeit und Dichte,

$$F_s = S \cdot D. \quad (9.7)$$

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 $1,9 \text{ P./m}^2$. 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 Beispiel für solch 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 Lafebene projizierten individuellen Körperfläche f in der Definition der Personendichte wird ein gegenüber den zuvor beschriebenen Handrechnungen höheres Maß an Flexibilität er-

reicht. Ergänzt wird die Methode durch Gleichungen, welche andere Rettungswege als die Ebene sowie den Vorgang der Staubildung und des Stauabbaus beschreiben.

Die Methode von Predtetschenski und Milinski kann eingesetzt werden, sofern die Eigenschaften der Fluchtwege die Bildung eines Personenstroms einheitlicher Dichte gestatten. In langgestreckten Geometrien (z. B. Rettungswege in Tunnelanlagen) ist das Verfahren nur modifiziert verwendbar, weil es die Veränderung des Personendichte über die Länge des Personenstroms nicht berücksichtigt [9.28]. Es existiert eine Umsetzung dieser Methode 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 Fluchtwege 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 Fluchtwegealternativen), 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. Fluchtwegewahl) 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 zufallsgesteuert 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 Simulationsprogramme 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.
- Die Bestimmung des individuellen Fluchtweges sollte die Analyse von Fluchtwegealternativen zulassen.

Für eine Bemessung geeigneter Räumungszeiten erhält man durch eine angemessene 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 (un-

günstigster Räumungsverlauf oder Vorgabe eines geeigneten Vertrauensintervalls). Ansonsten sind ausreichende Sicherheitszuschläge anzusetzen.

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 Räumungsereignissen,
- 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. sowohl das Modell von Predtetschenski und Milinski als auch 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 (und damit die erforderliche Fluchtzeit) 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 der 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 Fluchtzeit kleiner als verfügbare Fluchtzeit – 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 Stillstandsichte), 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 typischer Personendichten in Abhängigkeit von der Nutzungsart. Grundlage dieser Zusammenstellung sind entsprechende Richtlinien bzw. Verordnungen aus den USA, Großbritannien und Neuseeland [9.25 - 9.27]. Die dort gemachten Angaben zur Personendichte zeigen für gleiche oder ähnliche Nutzungen manchmal erhebliche Streuungen. 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].

Tabelle 9.8 Personendichte für verschiedene Nutzungsarten zur Anwendung bei Entfluchtungsberechnungen. Es wurde jeweils der höchste (gerundet) Wert aus den im Text angegebenen Referenzen verwendet. Bezugsgröße ist die nutzbare Nettofläche (Fläche innerhalb des inneren Umfangs der Außenwände, abzüglich Treppenhäuser, Liftanlagen, Sanitäranlagen, Innenwände, etc.).

Nutzung	Personendichte [P./m ²]
Stadion, Tribüne, Theater, etc.	
- Stehplätze	3,3
- freie Bestuhlung	1,5
- 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

9 Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren

Ausstellung, Messe	0,7
Spielcasino	1,0
Trainingsraum, Fitnesscenter	
- mit Geräten	0,2
- ohne Geräte	0,7
Restaurant	0,9
Bar, Club	
- Sitzbereich	1,0
- Stehbereich	2,0
- Tanzfläche	1,7
Schule	
- Klassenzimmer	0,5
- Labor / Übungsraum	0,2
Tagesstätten	0,3
Ladenpassage, Geschäft (für Einkaufszwecke)	0,3
Einkaufsmarkt (für Großgeräte, Möbel, etc.)	0,1
Ausstellungsraum	0,2
Büro	0,2
Schwimmbad	
- Wasserbecken	0,2
- Ruhe- und Spielbereich	0,35

9.7 Literatur

- [9.1] *PURSER, D.*: Behaviour and Travel Interactions in Emergency Situations and Data Needs for Engineering Design. Proceedings of the 2nd International Conference Pedestrian and Evacuation Dynamics, Greenwich, 2003.
- 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 Fluchtwege 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] *KEBEL, 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] Department of the Environment, Transport and the Regions, *Fire Safety – Approved Documents B 2000 Editions*, UK.
- [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] *STEGLICH, M.; WILK, E.*: Bestimmung der Zeiten für den Ausstieg von Personen aus Zugeinheiten und die Verteilung langgestreckter Personenströme im Ergebnis von Beobachtungen und Zeitmessungen, Brandschutz Consult - Ingenieurgesellschaft mbH, Leipzig, 2002.

10 SICHERHEITS- UND RISIKOBETRACHTUNGEN

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 Evakuierungszeiten.

Ganz allgemein umfassen die Anforderungen an ein globales Sicherheitskonzept für den vorbeugenden Brandschutz die Definition von Regeln und Methoden, mit denen Bauwerke ausreichend sicher und wirtschaftlich brandschutztechnisch bemessen, ausgeführt und genutzt werden können. Die Ziele des Sicherheitskonzeptes sind

- die Gewährleistung ausreichender Sicherheit für
 - Gebäudenutzer 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 aus Kostengründen notwendigen Wirtschaftlichkeit andererseits. Eine ausreichende Sicherheit liegt vor, wenn z. B. das Versagen eines Bauwerkes im Brandfall innerhalb der geplanten Nutzungsdauer mit einer akzeptierbar kleinen Wahrscheinlichkeit (Zielversagenswahrscheinlichkeit) auftritt.

Die Unsicherheiten bei ingenieurmäßigen Nachweisen können zwar, wie bisher üblich, mit deterministischen Sicherheitsfaktoren abgedeckt werden, die aufgrund langjähriger Erfahrung und subjektiver Einschätzung gewählt werden.

Sinnvoller ist jedoch ein probabilistisches Sicherheitskonzept, bei dem die stochastischen Eigenschaften der Modellparameter direkt berücksichtigt werden können. Als Sicherheitsmaß dient dabei die Versagenswahrscheinlichkeit der Bauteile. Bei der Tragwerksbemessung für den Brandfall handelt es sich dabei um die sogenannte bedingte Wahrscheinlich-

keit, dass die Struktur versagt, wenn sich ein bestimmter Bemessungsbrand eingestellt hat. In der Regel ist dies ein Brand, der in Selbsthilfe nicht mehr gelöscht werden kann, so dass er sich weiter ausbreitet und nach [10.1] als Kleinbrand b, Mittel- oder Großbrand bezeichnet wird. In den Versicherungsstatistiken können solche Brände z. B. durch Überschreitung einer bestimmten Schadenssumme identifiziert werden.

10.2 Unsicherheiten bei Nachweisen mit Ingenieurmethoden

In der Praxis werden ingenieurmäßige Verfahren bislang ohne jegliches Sicherheitskonzept angewendet. Dabei werden drei wichtige Einflüsse völlig vernachlässigt:

10.2.1 Streuungen der Modellgrößen

Die in den jeweiligen Modellen verwendeten Parameter können in Einwirkungsvariablen (sogenannte **stress**-Variablen, z. B. Brandlasten, Personenbelegungen) und Widerstandsvariablen (sogenannte **resistance**-Variablen, z. B. Grenztemperaturen, Mindestsichtweiten) unterteilt werden und unterliegen statistischen Verteilungen.

Eine ausreichende Sicherheit liegt vor, wenn das Versagen eines Bauwerkes oder das Auftreten von Todesfällen infolge Raucheinwirkung innerhalb der geplanten Nutzungsdauer mit einer akzeptierbar kleinen Wahrscheinlichkeit (Zielversagenswahrscheinlichkeit) auftritt. Versagen tritt ein, wenn einer der möglichen Grenzzustände der Konstruktion überschritten wurde.

In allgemeiner Schreibweise kann der Zustand einer Konstruktion wie folgt formuliert werden:

$$Z = R - S \quad (10.1)$$

mit

- Z Sicherheitsabstand
- R den Widerstand beschreibende Zufallsvariable (**resistance**-Variable)
- S die Einwirkung beschreibende Zufallsvariable (**stress**-Variable)

Der Grenzzustand wird bei $Z = 0$ erreicht, Versagen tritt bei $Z < 0$ ein. In der Praxis werden diese Zufallsvariablen häufig lediglich mit ihren Mittelwerten verwendet, was wie in Bild 10.1 vereinfacht dargestellt, zu einer erhöhten Anzahl von Versagensfällen in Form der Überschreitung von Grenzzuständen führen kann.

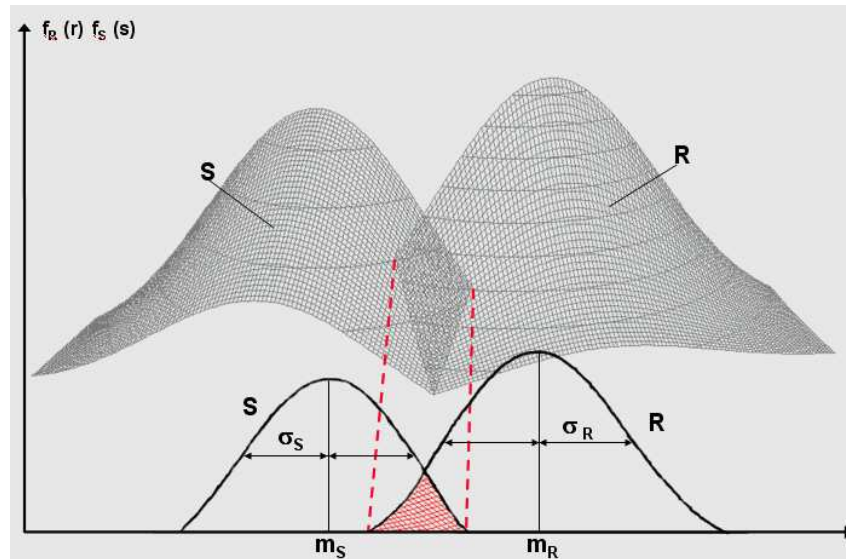


Bild 10.1 Graphische Darstellung der Grenzzustandsgleichung $Z = R - S$

10.2.2 Ausfallwahrscheinlichkeiten von Brandschutzmaßnahmen

Statistische Auswertungen von Brandereignissen zeigen, dass die anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen nicht 100 %ig zuverlässig sind, sondern eine individuell unterschiedliche Ausfallwahrscheinlichkeit aufweisen. In der Praxis wird dagegen stets davon ausgegangen, dass die entsprechende Maßnahme im Anforderungsfall absolut funktionsfähig ist, so dass ein brandschutztechnischer Nachweis bei dieser Annahme auf der unsicheren Seite liegen kann (siehe Kapitel 7).

10.2.3 Unsicherheiten der verwendeten Modelle

Aufgrund notwendiger Idealisierungen sind Abweichungen zwischen der rechnerisch ermittelten Brandwirkung und der experimentell bestimmten Temperaturbeanspruchung oder Raucheinwirkung unvermeidbar. Ebenso ergeben sich Unterschiede zwischen der rechnerisch bestimmten Bauteilbeanspruchbarkeit und dem bei Versuchen festgestellten Widerstand gegenüber der Wärmeeinwirkung. Entsprechendes gilt für die Simulation von Personenströmen. Auch hier können sich Abweichungen zwischen Berechnungen und Räumungsübungen ergeben.

Die Modellunsicherheit stellt die Größe dar, mit der das durch ein Modell berechnete Ergebnis korrigiert werden muss, um das tatsächliche, experimentell bestimmte Resultat zu erhalten. In der Praxis werden diese Modellunsicherheiten häufig vernachlässigt. Ansätze für ihre Berücksichtigung können in [10.2] nachgelesen werden.

Das Ignorieren der drei oben genannten Einflüsse führt dazu, dass eine Abschätzung des erzielten Sicherheitsniveaus praktisch nicht möglich ist. Es ist die Aufgabe des Sicherheitskonzeptes, diese Unsicherheiten zu kompensieren und das erforderliche Sicherheitsniveau zu gewährleisten.

10.3 Festlegung von Zielversagenswahrscheinlichkeiten und Risikoklassen

10.3.1 Allgemeines

Das angestrebte Sicherheitsniveau für die Bemessung eines Tragwerkes, die Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen oder die Bemessung von Flucht- und Rettungswegen wird mit Hilfe einer Zielversagenswahrscheinlichkeit p_f festgelegt, die sich an der bisherigen Bautradition orientiert. Dazu werden die Bemessungssituationen in Anlehnung an den Eurocode 1 in drei Risikoklassen eingeteilt, denen bestimmte Zielversagenswahrscheinlichkeiten p_f bzw. die damit korrespondierenden Sicherheitsindizes β zugeordnet werden.

Tabelle 10.1 Angestrebtes Sicherheitsniveau in Form der Zielversagenswahrscheinlichkeiten p_f und des korrespondierenden Sicherheitsindex β (Bezugszeitraum 1 Jahr)

	Risikoklassen		
	1	2	3
Zielversagenswahrscheinlichkeit p_f	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
Sicherheitsindex β	4,27	4,75	5,20
Risikoindex R_{isk}	$R_{isk} < 20$	$20 \leq R_{isk} < 50$	$R_{isk} \geq 50$

Während bei der Definition der Sicherheitsanforderungen bislang lediglich zwischen Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit unterschieden wurde, kann das Risiko nach [10.2] unter Berücksichtigung weiterer Einflüsse (R_i) feiner differenziert werden:

10.3.2 Schutzziel und Grenzzustand (R_1)

Bei diesem Kriterium wird danach differenziert, ob es sich bei der Bemessung vorrangig um das Schutzziel Personenschutz oder lediglich um den Sachschutz handelt, d. h. ob im Versagensfall (Überschreitung des betreffenden Grenzzustandes) Menschenleben gefährdet sind oder nicht.

- Bemessung von Bauteilen, deren Versagen zum Einsturz des Haupttragwerkes führt (statisch bestimmtes System) $\Rightarrow R_1 = 15$
- Bemessung von Entrauchungsanlagen $\Rightarrow R_1 = 15$
- Bemessung von Bauteilen, deren Versagen zum lokalen Einsturz von Nebentragwerken führt (statisch bestimmtes System) $\Rightarrow R_1 = 10$
- Bemessung von Bauteilen, deren Versagen nicht zum Einsturz von Haupt- oder Nebentragwerken führt (statisch unbestimmtes System mit Lastumlagerungsmöglichkeiten) $\Rightarrow R_1 = 0$

10.3.3 Versagensart (R_2)

Im Eurocode 1 [10.3] wird darauf hingewiesen, dass die dort angegebenen Werte für den Sicherheitsindex β als „geeignet in den meisten Fällen“ anzusehen sind, die aus Kalibrierungsuntersuchungen an Bemessungsnormen unterschiedlicher Länder herrühren. Es wird jedoch erwähnt, dass Abstufungen im Sicherheitsniveau in der Größenordnung von $\Delta\beta = 0,5$ bis 1,0 hinsichtlich der Versagensart sinnvoll seien.

Daher wird bei der Risikoindex-Methode zwischen Versagen mit Vorankündigung (duktil) und Versagen ohne Vorankündigung (spröde) unterschieden. Eine Stahlstütze beispielsweise, welche bei Überschreitung der kritischen Temperatur einen plötzlichen Steifigkeitsverlust erfährt und demzufolge ohne Vorankündigung versagt, führt zu einem Risikosummand $R_2 = 15$. Eine massive Holzstütze dagegen weist einen relativ stetigen Abbrand auf, so dass sie mit Vorankündigung versagt und daher ein Risikosummand $R_2 = 0$ angesetzt wird.

10.3.4 Fluchtmöglichkeiten der Nutzer (R_3)

Bei Sonderbauten mit großen Menschenansammlungen wie z. B. Verkaufsstätten oder Versammlungsstätten wie Sportarenen oder Theater hängt das brandschutztechnische Sicherheitsniveau stark von den Fluchtmöglichkeiten der Nutzer ab. Die entsprechenden Muster-Verordnungen berücksichtigen dies, indem Anforderungen an die Rettungswegbreite in Abhängigkeit der Personenanzahl oder der Nutzfläche gestellt werden. Diese Anforderungen basieren auf Erfahrungswerten und gewährleisten im Allgemeinen eine zügige Evakuierung ohne größere Stauungen.

Mit dem Risikosummand R_3 wird berücksichtigt, ob die Rettungswegbreiten eingehalten werden. Ist dies der Fall, ergibt sich der Risikosummand zu Null. Treten Unterschreitungen auf, erhöht sich der Risikosummand $R_3 = 10$ in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen dem erforderlichen Wert und der vorhandenen Ausgangsbreite.

Bei Unterschreitungen der erforderlichen Ausgangsbreiten gemäß der entsprechenden Sonderbaurichtlinie ist stets ein ingenieurmäßiger Nachweis mittels geeigneter Methoden zu führen, dass die Entfluchtung trotz der reduzierten Ausgangsbreite ausreichend schnell und ohne kritische Stauungen funktioniert. Eine Unterschreitung der erforderlichen Ausgangsbreite um mehr als 30 % ist grundsätzlich auszuschließen. Die Anforderungen an die einzelnen Ausgänge (z. B. 2 m lichte Breite der Türen bei Shops $> 500 \text{ m}^2$) sind stets einzuhalten.

Beispiel Versammlungsstätte:

Nutzung für 800 Personen vorgesehen; vorhandene Ausgangsbreite 3,6 m; erforderliche Ausgangsbreite nach Muster-Versammlungsstättenverordnung [10.4] 4,8 m (0,6 m je 100 Personen).

$$\text{Risikosummand } R_3 = 10 \cdot \frac{4,8}{3,6} = 10 \cdot 1,33 = 13,3$$

Beispiel Verkaufsstätte:

Verkaufsfläche 10.000 m²; vorhandene Ausgangsbreite 20 m; erforderliche Ausgangsbreite nach Muster-Verkaufsstättenverordnung [10.5] 30 m (0,3 m je 100 m² Verkaufsfläche)

$$\text{Risikosummand } R_3 = 10 \cdot \frac{30}{20} = 10 \cdot 1,5 = 15$$

10.3.5 Rettungsmöglichkeiten der Feuerwehr (R₄)

Die Fußbodenhöhe des obersten Geschosses mit Aufenthaltsräumen eines Gebäudes spielt bei der Einstufung in die drei Risikoklassen eine wichtige Rolle. Bei diesem Kriterium wird sich an der grundlegenden Einteilung der Gebäude bezüglich ihrer Höhe nach der Musterbauordnung [10.6] orientiert. Diese richtet sich in erster Linie nach dem Rettungsgerät der Feuerwehr und teilt die Gebäude grundsätzlich in solche geringer Höhe, mittlerer Höhe sowie Hochhäuser ein.

Tabelle 10.2 Einteilung der Gebäude nach ihrer Höhe gemäß MBO 2002

Gebäude	Fußbodenhöhe	2. Rettungsweg
geringer Höhe (GK 1-3)	≤ 7 m	Steckleiter
mittlerer Höhe (GK 4)	7 m < h ≤ 13 m	Drehleiter
mittlerer Höhe (GK 5)	13 m < h ≤ 22 m	Drehleiter
Hochhaus (GK 5)	> 22 m	2. baulicher Rettungsweg oder Sicherheitstuppenraum

Hochhäuser erhalten einen Risikosummand R₄ = 10, da die benötigte Zeit für die Flucht und Rettung hier ungleich größer ist und die sichere Evakuierung u. a. nur bei zuverlässiger Aufrechterhaltung der Standsicherheit der Tragkonstruktion gewährleistet ist.

Bei Gebäuden mittlerer Höhe ist der Zeitbedarf für die Flucht und Rettung geringer, daher wird hier ein Risikosummand R₄ = 5 zugewiesen. Gebäude geringer Höhe weisen bezüglich der Flucht und Rettung das geringste Risiko auf, so dass dort ein Risikosummand R₄ = 0 gewählt wird.

10.3.6 Bedeutung des Gebäudes (R₅)

Der gesellschaftliche Stellenwert eines Gebäudes ist ein subjektives Kriterium für die Berücksichtigung des Sachschutzes und hängt von der Sichtweise desjenigen ab, der das betreffende Gebäude einstuft. In erster Linie wird mit diesem Kriterium die Möglichkeit geschaffen, unersetzbare Dinge zuverlässiger vor Brandschäden zu schützen. Dabei wird vorrangig an Museen oder denkmalgeschützte Gebäude gedacht. Da es hierbei nicht um den

Schutz von Menschenleben geht, wird dieses Kriterium weniger stark gewichtet als die vorangegangenen vier Einflüsse. Wird dem Gebäude eine hohe gesellschaftliche Bedeutung eingeräumt, nimmt der Risikosummand R_5 den Wert 5 an, andernfalls wird er zu Null gesetzt.

10.3.7 Zu erwartender wirtschaftlicher Schaden im Brandfall (R_6)

Der im Brandfall zu erwartende Sachschaden ist ein weiteres subjektives Kriterium, da es auch hier im Auge des Betrachters liegt, welcher Sachschaden als hoch empfunden wird. Bei diesem Kriterium wird ganz bewusst der nötige Spielraum geschaffen, um in Absprache mit dem Bauherrn und dem Versicherer das angestrebte Sicherheitsniveau ggf. leicht anzuheben. Dementsprechend kann der Risikosummand zu $R_6 = 5$ oder alternativ zu 0 gesetzt werden.

Die Beträge der Risikosummanden für die sechs Kriterien wurden bezüglich ihres Verhältnisses zueinander so gewählt, dass die Gefährdung von Personen deutlich höher gewichtet wird als die Gefährdung von Sachwerten. Im Vordergrund steht bei der Einstufung in eine Risikoklasse stets die Sicherstellung der Flucht und Rettung der Nutzer. Die Summanden R_1 bis R_4 beziehen sich unter Heranziehung von Kriterien in Anlehnung an gültige bauaufsichtliche Beurteilungsgrundlagen direkt auf das Schutzziel der Flucht und Rettung (Personenschutz). Die Kriterien R_5 und R_6 sind subjektiver Natur und berücksichtigen den Sachschutz. Aus der Summe der sechs Einzelwerte ergibt sich der Risikoindex R_{isk} , mit dem aus Tabelle 10.1 die Risikoklasse und die Zielversagenswahrscheinlichkeit p_f entnommen werden können.

Die Risikoindex-Methode kann mit dem zuverlässigkeitsorientierten Optimierungsalgorithmus nach Rackwitz [10.7] unter Berücksichtigung des so genannten Life-Quality-Index überprüft bzw. kalibriert werden. Das Risikoindex-Verfahren (Punkte-Methode) soll dabei größenordnungsmäßig dieselben Zielversagenswahrscheinlichkeiten ergeben wie das komplexe Verfahren nach [10.7].

Das gleichzeitige Auftreten bestimmter risikoerhöhender Einflüsse (z. B. Versagen ohne Vorankündigung + mehrgeschossiges Gebäude + Nutzung mit Unterschreitung der erforderlichen Rettungswegbreite) führt über einen hohen Risikoindex R_{isk} zu einer höheren Risikoklasse und damit zu einer geringeren akzeptierten Zielversagenswahrscheinlichkeit p_f . Günstigere Bedingungen (z. B. Bemessung eines Bauteils in einem Tragwerk mit Systemreserven + Gebäude geringer Höhe) ergeben einen kleineren Risikoindex und damit auch eine geringere Risikoklasse. Bei der praxisgerechten Bemessung mit deterministischen Bemessungsgleichungen und probabilistisch hergeleiteten Sicherheitselementen wird die Zuordnung in eine bestimmte Risikoklasse durch die Verwendung der entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt.

10.4 Probabilistische Brandschutzbemessung

Durch Auswertung von Brandstatistiken kann in Abhängigkeit der Nutzung des Gebäudes und der vorhandenen Brandabschnittsfläche die Brandausbreitungswahrscheinlichkeit p_{BA} (Wahrscheinlichkeit der Ausweitung eines Entstehungsbrandes zu einem fortentwickelten

Brand) bestimmt werden. Aus der Zielversagenswahrscheinlichkeit p_f und der Brandausbreitungswahrscheinlichkeit p_{BA} ergibt sich die zulässige bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall zu $p_{fBA} = p_f / p_{BA}$ für die betreffende Bemessungssituation.

Hiermit ist die vorhandene bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall p_{fBA} zu vergleichen, die mit Hilfe einer relativ aufwändigen Systemzuverlässigkeitsanalyse bestimmt werden kann. Die Berechnung muss zeitabhängig erfolgen, da sich die Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauteils während des Brandes mit den vom Brand beeinflussten Randbedingungen und Einflussgrößen ändert. Dazu werden alle möglichen Brandszenarien je nach Funktion und Ausfall der vorhandenen brandschutztechnischen Infrastruktur und der wesentlichen brandbeeinflussenden Größen wie Brandlast und Ventilation in einem Ereignisablaufdiagramm dargestellt (Bild 10.2).

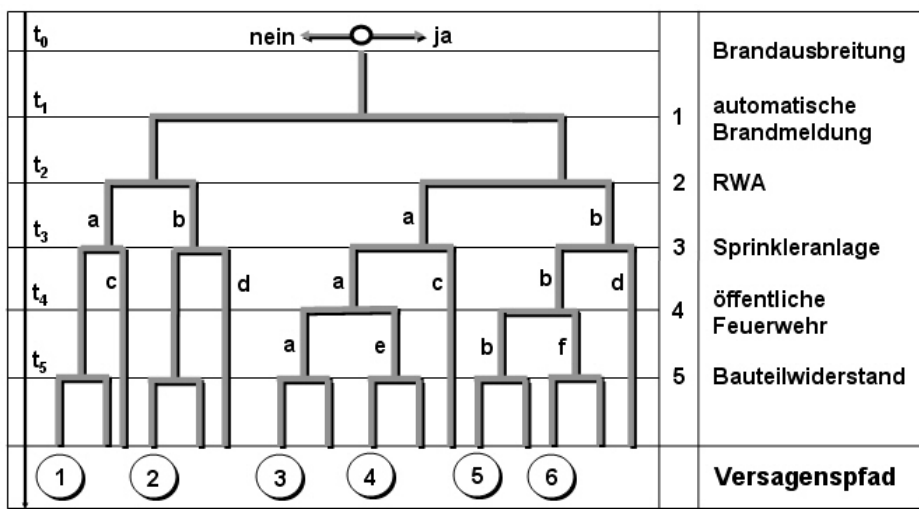


Bild 10.2 Ereignisablaufanalysen zur Ermittlung von Versagenspfaden

Den einzelnen Ereignispfaden sind unterschiedliche Brandverläufe (a bis f in Bild 10.3) zuzuordnen, die durch den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrate beschrieben werden.

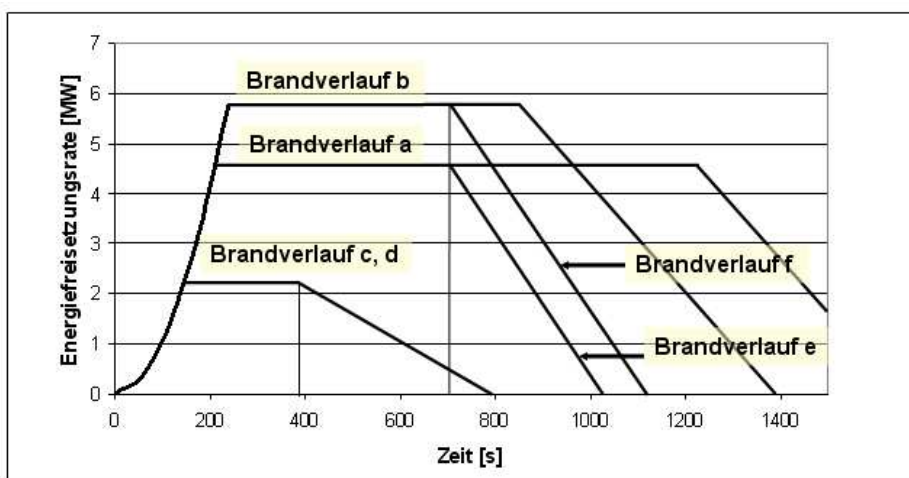


Bild 10.3 Brandverläufe (qualitativ) in Abhängigkeit von Funktion und Ausfall der anlagentechnischen und abwehrenden Komponenten

10 Sicherheits- und Risikobetrachtungen

Für weitere Einzelheiten der Systemzuverlässigkeitsanalyse wie die Festlegung des stochastischen Modells der streuenden Einflussgrößen und die Untersuchung des Ausfalls einzelner Maßnahmen mittels Fehlerbäumen wird auf [10.2] verwiesen. In Bild 10.4 wird der Ablauf der probabilistischen Bemessung vereinfacht als Flussdiagramm zusammengefasst.

Das probabilistische Verfahren [10.2] ist relativ komplex und eignet sich nicht für die tägliche Bemessungspraxis. Die Anwendung sollte daher auf Sonderfälle beschränkt bleiben.

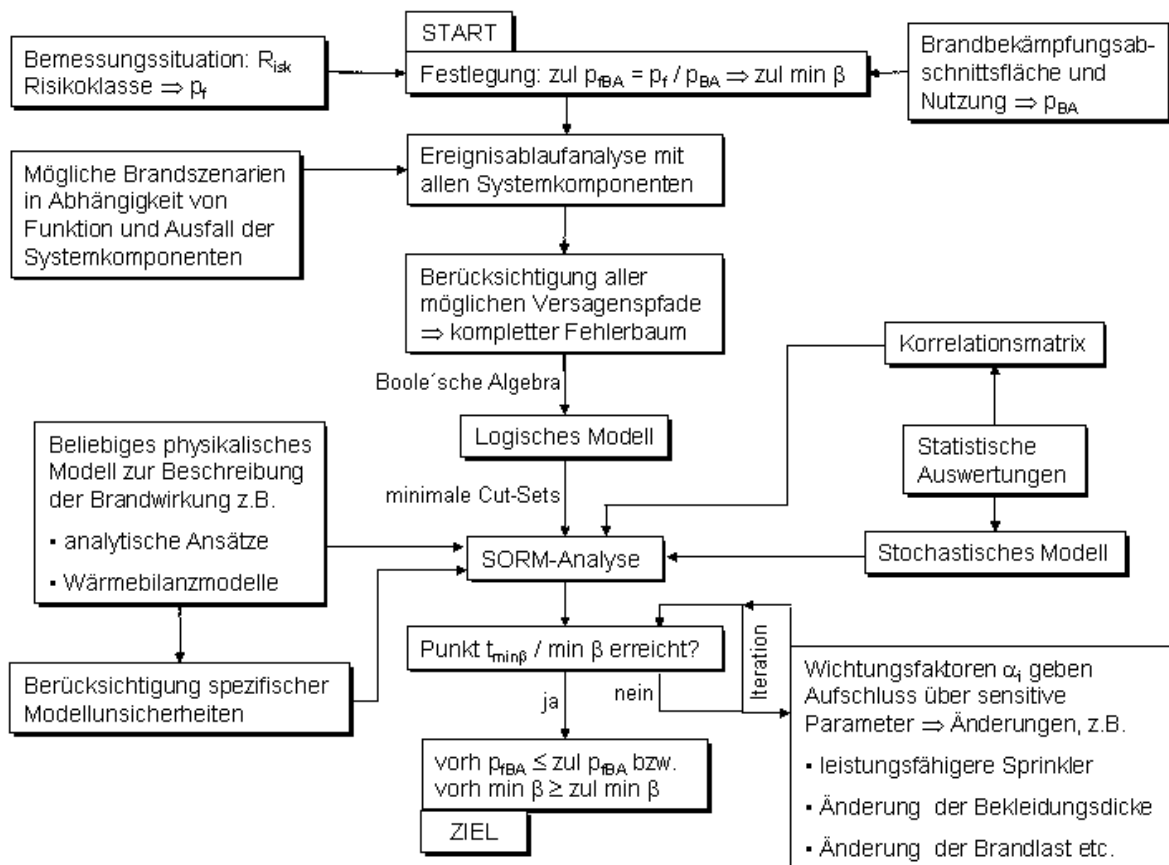


Bild 10.4 Flussdiagramm für die probabilistische Bemessung

10.5 Brandschutztechnische Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten

In der Praxis erfolgt die Bemessung im Regelfall semi-probabilistisch mit Teilsicherheitsbeiwerten, die mit dem in Abschnitt 10.4 vorgestellten probabilistischen Verfahren hergeleitet werden. Die Herleitung muss nutzungsspezifisch erfolgen, da sich insbesondere die Wahrscheinlichkeit einer Brandausbreitung p_{BA} und die Streuungen der Brandlasten je nach Nutzung erheblich unterscheiden können. In [10.2] wurden Teilsicherheitsbeiwerte für eine industrielle Nutzung ermittelt. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_S erhöht dabei die Energiefreisetzungsrates, während γ_R die Bauteilbeanspruchbarkeit reduziert.

Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_R und γ_S , die in den Tabellen 10.3 und 10.4 aufgeführt sind, können für eine übliche Wohnnutzung als konservativ angenommen werden. Eine Übertragung der Randbedingungen im Industriebau auf beliebige Nutzungen ist jedoch nicht ohne Weiter-

res möglich; die für die industrielle Nutzung ermittelten Sicherheitselemente könnten dort unter Umständen auf der unsicheren Seite liegen. Die Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten in der Praxis erfordert die rechnerische Ermittlung der Sicherheitselemente für alle Nutzungen, da sich sowohl die Streuungen der Brandlasten als auch die Wahrscheinlichkeit einer Brandausbreitung je nach Nutzung unterscheiden. Denkbar ist auch eine Übertragungsfunktion, welche die vorhandenen Sicherheitselemente nutzungsspezifisch umrechnet.

Tabelle 10.3 Teilsicherheitsbeiwerte γ_R und γ_S (selbsttätige Löschanlage vorhanden)

Fläche	Risikoklasse						
	1		2		3		
	γ_R	γ_S	γ_R	γ_S	γ_R	γ_S	
≤ 2500	0,92	1,3	0,88	1,5	0,86	2,0	Zu bemessendes Objekt befindet sich im Wirkungsbereich einer nach VdS-Standard errichteten selbsttätigen Löschanlage
5000	0,91	1,4	0,87	1,7	0,85	2,1	
10000	0,90	1,5	0,87	1,8	0,85	2,2	
20000	0,90	1,6	0,86	2,0	0,84	2,4	
30000	0,89	1,7	0,85	2,1	0,83	2,6	
60000	0,88	1,8	0,85	2,3	0,83	2,8	
120000	0,87	2,0	0,84	2,5	0,82	3,0	

Tabelle 10.4 Teilsicherheitsbeiwerte γ_R und γ_S (keine selbsttätige Löschanlage vorhanden)

Fläche	Risikoklasse						
	1		2		3		
	γ_R	γ_S	γ_R	γ_S	γ_R	γ_S	
2500	0,93	1,1	0,88	1,2	0,87	1,3	Zu bemessendes Objekt befindet sich nicht im Wirkungsbereich einer nach VdS-Standard errichteten selbsttätigen Löschanlage
5000	0,92	1,1	0,88	1,2	0,86	1,4	
10000	0,92	1,2	0,87	1,3	0,86	1,4	
20000	0,91	1,2	0,87	1,3	0,85	1,5	
30000	0,90	1,2	0,86	1,4	0,84	1,5	
60000	0,89	1,3	0,86	1,4	0,84	1,6	
120000	0,88	1,3	0,85	1,5	0,83	1,6	

Die Sicherheitselemente unterscheiden sich in ihrem Betrag signifikant beim Vorhandensein einer automatischen Löschanlage. Die möglichen Bemessungsfälle bezüglich der vorhandenen anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen lassen sich daher in zwei Gruppen einteilen:

- Gruppe I: automatische Löschanlage (nach VdS-Standard errichtet und gewartet) vorhanden
- Gruppe II: keine automatische Löschanlage vorhanden

Die Sicherheitselemente müssen für diese beiden Gruppen in separaten Tabellen aufgeführt werden. Der signifikante betragsmäßige Unterschied im Teilsicherheitsbeiwert γ_S bei Annahme einer automatischen Löschanlage lässt sich einfach erklären: der positive Effekt einer Löschanlage auf den Brandverlauf wird über eine deutliche Reduzierung des charakteristischen Wertes der Energiefreisetzungsrate im Brandmodell berücksichtigt. Die Versagenswahrscheinlichkeit der anlagentechnischen Komponente könnte durch die vergleichsweise geringen Teilsicherheitsbeiwerte γ_S der Gruppe II nicht kompensiert werden, da diese infolge der deutlich geringeren charakteristischen Energiefreisetzungsraten in Gruppe I durchgängig zu ebenfalls kleinen Bemessungsenergifreisetzungsraten führen würden. Dies wiederum hätte zur Folge, dass bei Vorhandensein einer automatischen Löschanlage z. B. grundsätzlich keinerlei bauliche Brandschutzmaßnahmen erforderlich wären, was letztendlich dazu führen würde, dass die geforderten Zielversagenswahrscheinlichkeiten p_f nicht erreicht werden könnten. Die höheren Teilsicherheitsbeiwerte γ_S der Gruppe I dagegen können je nach den im Einzelfall vorhandenen Randbedingungen bezüglich Brandlast und Gebäudegeometrie, der vorliegenden Risikoklasse und der Brandbekämpfungsabschnittsfläche zu geringen baulichen Brandschutzmaßnahmen führen, welche jedoch die Versagenswahrscheinlichkeiten der Löschanlagen kompensieren und damit für die Gewährleistung der angestrebten Zielversagenswahrscheinlichkeit p_f sorgen.

Die durchgängig kleineren Beträge der Teilsicherheitsbeiwerte γ_R und γ_S in Gruppe II lassen sich nicht etwa damit begründen, dass die dort zu Grunde gelegten Brandschutzmaßnahmen zuverlässiger sind als die in Gruppe I vorausgesetzten automatischen Löschanlagen. Ein Blick in das stochastische Modell der Zufallsvariablen in Abschnitt 10.6 beweist, dass eher das Gegenteil der Fall ist. Der Grund ist auch hier im jeweiligen Brandmodell verankert: ist keine automatische Löschanlage vorhanden, ergeben sich in der Regel deutlich höhere charakteristische Werte der Energiefreisetzungsrate, so dass in diesem Fall geringere Teilsicherheitsbeiwerte γ_S erforderlich sind, um die Bemessungsenergifreisetzungsrate auf einen Betrag zu erhöhen, der den nötigen Sicherheitsabstand zur Einhaltung der Zielversagenswahrscheinlichkeit p_f herstellt.

Wenn im Falle der Berechnung von Evakuierungszeiten der Teilsicherheitsbeiwert γ_S zur Bestimmung des Bemessungswertes der Personenbelegung verwendet wird, sind die Teilsicherheitsbeiwerte grundsätzlich aus Tabelle 10.4 einzusetzen (Fall 2, siehe unten), auch wenn eine Sprinkleranlage vorhanden ist.

Bei der Bemessung von Entrauchungsmaßnahmen bzw. dem Nachweis einer raucharmen Schicht verläuft der Nachweis analog: Der Teilsicherheitsbeiwert γ_S erhöht die Energiefreisetzungsrates als Quellterm für ein Plume-, Zonen- oder Feldmodell und der Teilsicherheitsbeiwert γ_R reduziert eine kritische Gaskonzentration (Multiplikation mit γ_R) oder erhöht eine nachzuweisende Mindestsichtweite (Division durch γ_R).

Entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte könnten über die Bauteilbemessung und Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen hinaus auch für die Berechnung von Evakuierungszeiten und damit für die Bemessung von Flucht- und Rettungswegen ermittelt werden. In Anbetracht einer unkomplizierten und nachvollziehbaren Anwendung des Sicherheitskonzeptes muss jedoch angestrebt werden, die Teilsicherheitsbeiwerte im Rahmen eines globalen Sicherheitskonzeptes einheitlich zu gestalten.

Im Bereich der Berechnung von Evakuierungszeiten für Flucht- und Rettungskonzepte hat sich die Anzahl der zu evakuierenden Personen als Einwirkungsgröße mit maßgeblichem Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit herausgestellt, da sowohl der entsprechende Gradient in der Modellrechnung als auch die Streuung der Variable relativ groß ist. Mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_S wird daher die Personenanzahl multiplikativ erhöht.

Die Rettungswegbreite als Widerstandsgröße besitzt zwar einen hohen Gradient in der Berechnung, da sie als geometrische Größe jedoch eine vergleichsweise geringe Streuung aufweist, ist ihr Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit eher gering zu bewerten. Die Variable „Rettungswegbreite“ eignet sich daher nicht dazu, mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_R belegt zu werden. Berechnungen haben ergeben, dass die zur Verfügung stehende Evakuierungszeit $t_{\text{verfügbar}}$ eine große Streubreite besitzt und damit größeren Einfluss auf das Systemversagen hat, wenn sie, wie in der Praxis gebräuchlich, ohne Rechnung pauschal festgelegt wird.

Die Zeit $t_{\text{verfügbar}}$ stellt die Zeitspanne dar, innerhalb der die im Gebäude befindlichen Personen nicht durch Brandwirkungen geschädigt werden. Der Wert kann gleichgesetzt werden mit der Zeitdauer, während der eine raucharme Schicht bestimmter Dicke aufrechterhalten bleibt und / oder während der ein Feuerwiderstand der Tragkonstruktionen vorhanden ist.

Daher wird die zur Verfügung stehende Evakuierungszeit $t_{\text{verfügbar}}$ mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_R reduziert, wenn diese Größe ohne Rechnung pauschal festgelegt wird.

Bei der Berechnung von Evakuierungszeiten und der Bemessung von Rettungswegen muss man zwischen zwei Fällen unterscheiden:

Fall 1

Der Bemessungswert der erforderlichen Zeit für die Entfluchtung $t_{\text{Räumung,d}}$ wird mittels Ingenieurmethoden bestimmt (z. B. durch Personenstromsimulationen).

Der Bemessungswert der zur Verfügung stehenden Evakuierungszeit $t_{\text{verfügbar,d}}$ ergibt sich ebenfalls aus einem ingenieurmäßigen Nachweis zur Bestimmung der Rauchausbreitung und / oder der Feuerwiderstandsfähigkeit eines nicht klassifizierten Bauteils.

10 Sicherheits- und Risikobetrachtungen

Dabei werden die Entrauchungsmaßnahmen bzw. die Feuerwiderstände der Bauteile mittels Ingenieurmethoden so ausgelegt, dass gilt:

$$t_{\text{Räumung,d}} \leq t_{\text{verfügbar,d}} \quad (10.2)$$

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

Der Wert $t_{\text{verfügbar,d}}$ beinhaltet bereits die Teilsicherheitsbeiwerte γ_R und γ_S . Eine Reduzierung von $t_{\text{verfügbar,d}}$ durch γ_R muss entfallen, da ansonsten die erforderlichen Sicherheiten doppelt berücksichtigt würden. Im Rahmen der Berechnung des Wertes $t_{\text{Räumung,d}}$ wird daher lediglich die Personenanzahl mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_S belegt, um die Streuungen der Variablen des Verfahrens für die Berechnung der Evakuierungszeit und die modellspezifischen Unsicherheiten zu berücksichtigen.

Beispiel:

Mehrgeschossige Industriehalle, Nutzfläche 5.000 m^2 , Risikoklasse 2, charakteristische Energiefreisetzungsrate $Q_{\text{char}} = 10 \text{ MW}$; nach Tabelle 10.4 $\gamma_S = 1,2 \Rightarrow$ Bemessungsenergiefreisetzungsrate $Q_d = 10 \cdot 1,2 = 12 \text{ MW}$

Charakteristischer Wert der Mindestsichtweite $V_{\text{is,c}} = 15 \text{ m}$; nach Tabelle 10.4 $\gamma_R = 0,88 \Rightarrow$ Bemessungswert der Mindestsichtweite $V_{\text{is,d}} = 15 / 0,88 = 17 \text{ m}$

Aus der Modellrechnung ergibt sich unter Verwendung von Q_d und $V_{\text{is,d}}$ ein Bemessungswert der für die Entfluchtung zur Verfügung stehenden Zeit $t_{\text{verfügbar,d}}$ von 13 min.

Anzahl der Nutzer: $P_c = 300$; nach Tabelle 10.4 $\gamma_S = 1,2 \Rightarrow$ Bemessungswert der Nutzeranzahl $P_d = 360$

Aus der Modellrechnung ergibt sich unter Verwendung von P_d ein Bemessungswert der für die Entfluchtung erforderlichen Zeit von $t_{\text{Räumung,d}} = 9 \text{ min}$.

Nachweis: $t_{\text{Räumung,d}} = 9 \text{ min} \leq t_{\text{verfügbar,d}} = 13 \text{ min}$

Fall 2

In diesem Falle wird die zur Verfügung stehende Evakuierungszeit nicht mittels Ingenieurmethoden bestimmt, sondern es wird ein charakteristischer Wert $t_{\text{verfügbar,c}}$ pauschal festgesetzt. Dieser Fall tritt ein, wenn z. B. die Bauaufsicht, die zuständige Feuerwehr oder der Betreiber einer Anlage einen Richtwert für die Evakuierungszeit vorgibt.

Die erforderlichen Sicherheiten werden hier erzielt, indem die Personenanzahl mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_S belegt wird und der vorab festgelegte charakteristische Wert $t_{\text{verfügbar,c}}$ mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_R multipliziert wird.

Beispiel:

Flughafenterminal, Nutzfläche 10.000 m²; Risikoklasse 2, charakteristische Personenanzahl $P_c = 500$; nach Tabelle 10.4 $\gamma_S = 1,3 \Rightarrow$ Bemessungswert der Nutzeranzahl $P_d = 650$

Aus der Modellrechnung ergibt sich unter Verwendung von P_d ein Bemessungswert der für die Entfluchtung erforderlichen Zeit von $t_{\text{Räumung,d}} = 7$ min.

Behördliche Festlegung: $t_{\text{verfügbar,c}} = 10$ min, nach Tabelle 10.4 $\gamma_R = 0,87 \Rightarrow$ Bemessungswert der für die Entfluchtung zur Verfügung stehenden Zeit $t_{\text{verfügbar,d}} = 10 \cdot 0,87 = 8,7$ min

Nachweis: $t_{\text{Räumung,d}} = 7 \text{ min} \leq t_{\text{verfügbar,d}} = 8,7 \text{ min}$

10.6 Annahmen für die Herleitung der Teilsicherheitsbeiwerte

Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_S und γ_R für die industrielle Nutzung wurden unter Verwendung der folgenden Quantilwerte der für die Zuverlässigkeit maßgebenden Basisvariablen berechnet:

- 0,8-Quantil der Brandlast
- 0,05-Quantil der von der anerkannten Werkfeuerwehr bzw. der öffentlichen Feuerwehr löschraren Brandfläche
- 0,9-Quantil der Hilfsfrist der öffentlichen Feuerwehr
- charakteristische Werte der statischen Beanspruchung und der Tragfähigkeit im Brandfall gemäß Eurocode [10.9]

Alle weiteren Größen werden mit Mittelwerten verwendet.

Die Streuungen der Brandlast wurden mit 25 % angenommen, die der abwehrenden und anlagentechnischen Maßnahmen mit 30 %.

Bezüglich der Zuverlässigkeit anlagentechnischer und abwehrender Brandschutzmaßnahmen wurden folgende Versagenswahrscheinlichkeiten im Anforderungsfall angenommen:

- | | |
|------------------------------|-------|
| • Sprinkleranlagen | 2,0 % |
| • Brandmeldeanlagen | 7,9 % |
| • automatische Auslösung RWA | 10 % |

Die Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte erfolgte für eine Brandausbreitungswahrscheinlichkeit (\cong Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Szenarios \geq Kleinbrand b nach DIN 14010 [10.6]) von $p_{BA} = 10^{-6}/(m^2a)$. Bei geringeren Brandausbreitungswahrscheinlichkeiten ist das Verfahren konservativ.

10.7 Zusammenfassung

Es wurde ein globales probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen vorgestellt. Die bestehenden Konzeptvorschläge für die Bauteilauslegung im Brandfall beruhen im Wesentlichen auf dem Berechnungsverfahren nach DIN 18230-1 [10.1], welches sich für den Bereich des Industriebaus bewährt hat. Sie sind jedoch in ihrer Anwendung in der Regel auf einen bestimmten Nutzungsbereich begrenzt und können zudem nicht in Verbindung mit Wärmebilanzmodellen eingesetzt werden, sofern sie auf dem Prinzip der äquivalenten Branddauer beruhen. Die bisherigen Konzepte ermöglichen außerdem keinen direkten Vergleich anlagentechnischer und abwehrender Einrichtungen mit baulichen Brandschutzmaßnahmen, da ein objektiver Vergleichsmaßstab fehlt.

Das hier vorgestellte Konzept dagegen besitzt Gültigkeit für beliebige Nutzungen, sofern die nutzungsspezifischen Brandlaststreuungen und die Brandausbreitungswahrscheinlichkeiten bekannt sind. Es kann in Verbindung mit beliebigen Ingenieurmethoden verwendet werden, sofern die spezifischen Modellunsicherheiten quantifiziert werden können. Dies ermöglicht ein einheitliches Sicherheitsniveau beim Einsatz von Wärmebilanzmodellen, Plume-Fomeln, FEM und Personenstromsimulationsmodellen.

Das Sicherheitskonzept bietet einen objektiven Vergleich anlagentechnischer und abwehrender Brandschutzeinrichtungen mit baulichen Maßnahmen in Form der jeweils erzielten bedingten Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall als Maßstab.

Es wurde eine Punktemethode zur Einstufung von Bemessungsfällen in drei Risikoklassen und damit zur Zuordnung von Zielversagenswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von sechs Kriterien vorgestellt. Die Einstufungskriterien und Zielversagenswahrscheinlichkeiten orientieren sich im Wesentlichen am Eurocode [10.3] und dem bestehenden deutschen Bauordnungsrecht [10.4]. Alternativ kann im Einzelfall eine auf die jeweilige Bemessungssituation genau abgestimmte, gesellschaftlich akzeptierte Zielversagenswahrscheinlichkeit mit Hilfe eines zuverlässigkeitsorientierten Optimierungsalgorithmus nach Rackwitz [10.5] bestimmt werden.

Bislang wurden lediglich Sicherheitselemente für die industrielle Nutzung ermittelt [10.2]. Um die Anwendung des semi-probabilistischen Verfahrens für beliebige Nutzungen zu ermöglichen, müssen die Teilsicherheitsbeiwerte nutzungsspezifisch angepasst werden. Außerdem müsste eine zentral erfasste Brandstatistik der Feuerwehren über einen längeren Zeitraum hinweg ausgewertet werden, um die in Abschnitt 10.6 angegebenen Werte besser abzuschern. Weitere Forschung ist auch im Bereich der Anlagentechnik erforderlich, da diese einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit im Brandfall hat.

Vergleicht man das Sicherheitskonzept mit der Vorgehensweise nach DIN 18230-1 [10.8], kommt man zu dem Ergebnis, dass sich auf die erforderliche Feuerwiderstandsdauer bezo-

gen grundsätzlich ähnliche Resultate ergeben, wobei jedoch der bauliche Brandschutz mit dem vorgestellten Konzept dort platziert werden kann, wo er physikalisch tatsächlich benötigt wird, indem das tatsächliche, meist lokal begrenzte Brandszenario unter Einbeziehung der anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen betrachtet wird. Die Anwendung des Sicherheitskonzeptes im Rahmen der Brandschutzbemessung führt somit einerseits zu deutlichen Kostenreduzierungen und andererseits zu einem einheitlichen und vor allem messbaren Sicherheitsniveau.

10.8 Literatur

- [10.1] DIN 14010. Angaben zur statistischen Erfassung von Bränden, Ausgabe Juli 1999.
- [10.2] *DEHNE, M.*: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung. Dissertation. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, September 2003.
- [10.3] Eurocode 1. DIN V ENV 1991-2-2. Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Ausgabe 1995.
- [10.4] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung) MVStättVO, Fassung Mai 2002.
- [10.5] Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung) MVkVO, Fassung September 1995.
- [10.6] Musterbauordnung (MBO), Ausgabe November 2002.
- [10.7] *RACKWITZ, R.*; *STREICHER, H.*: Optimization and Target Reliabilities. JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration, Zürich, März 2003.
- [10.8] DIN 18230-1. Baulicher Brandschutz im Industriebau. Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Ausgabe Mai 1998.
- [10.9] DIN V ENV 1993-1-2. Eurocode 3. Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln; Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung, Ausgabe Mai 1997.

ANHANG 1 BEZEICHNUNGEN UND SYMBOLE

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
α	Konstante	-	0,44
α	Parameter des Zunahmemechanismus der Wärmefreisetzungsrate	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	Sicherheitsindex	-	entfällt
β^2	Verhältnis Temperatur zu Geschwindigkeit im Profil	-	0,913
χ_r	radiativer Anteil der Energiefreisetzungsrate	-	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 ($= \epsilon_t \cdot \epsilon_m$)	-	entfällt
ϵ_t	Emissionsgrad des Brandraums	-	entfällt
γ	Sicherheitsbeiwert	-	entfällt
γ_{GA}	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen	-	entfällt
$\gamma_{n,c}, \gamma_{n,r}$	Faktor zur Berücksichtigung nationaler Brandversuche	-	entfällt
$\gamma_{M,fi}$	Teilsicherheitsbeiwert	-	entfällt
γ_R, γ_S	Teilsicherheitsbeiwert	-	entfällt
η_{fi}	Reduktionsfaktor (abhängig von $\xi = Q_{k,1}/G_k$)	-	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK	entfällt
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK	entfällt
ν	kinematische Viskosität	m ² /s	entfällt
ρ	Dichte des Gasgemisches	kg/m ³	entfällt
ρ	Dichte	kg/m ³	entfällt
ρ	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
$\Psi_{1,1}, \Psi_{2,i}$	Kombinationsbeiwerte nach EC 1 Teil 1	-	entfällt
Φ	Abschattungsfaktor	-	entfällt
ϑ	Temperatur	°C od. K	entfällt
$\Delta\vartheta$	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

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

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	J/kgK	entfällt
c _p	spez. Wärmekapazität der Kaltgasschicht	kJ/kgK	entfällt
c _{Rauch}	Rauchkonzentration	m ² /g	entfällt
c _v	spezielle Wärme bei konstantem Volumen	kJ/kgK	entfällt
d	Dicke der Rauchgasschicht	m	entfällt
f	Ähnlichkeitsfaktor	-	entfällt
f _{ck}	Zylinderdruckfestigkeit	N/mm ²	entfällt
f _{pk}	Streckgrenze (Spannstahl)	N/mm ²	entfällt
f _{yk} , f _{ay}	Streckgrenze (Beton- / Baustahl)	N/mm ²	entfällt
g	Erdbeschleunigung	m/s ²	9,81
h	Gebäudehöhe	m	entfällt
h _{Fenster}	Höhe der Fenster als Zuluftöffnung	m	entfällt
h _{Fenster}	Höhe der Öffnungen	m	entfällt
ḥ _c	die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandebenerscheinungen im Brandraum freigesetzte Energie	J/s	entfällt
ḥ _g	die im Brandraum pro Zeiteinheit gespeicherte Energie der Rauchgase, welche die Brandraumtemperatur bestimmt	J/s	entfällt
ḥ _l	die durch den Gaswechsel (Konvektion durch Öffnungen) pro Zeiteinheit abströmende Energie der Rauchgase (Konvektionsenergie)	J/s	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
\dot{h}_o	die durch die Fensterstrahlung pro Zeiteinheit entzogene Energie	J/s	entfällt
\dot{h}_s	sonstige pro Zeiteinheit verlorene Energieanteile (z. B. Speicherenergie von Einbauten)	J/s	entfällt
\dot{h}_w	die durch die Konvektion und Strahlung an die Umfassungsbauteile pro Zeiteinheit abgegebene Energie	J/s	entfällt
h'_{net}	Wärmestromdichte	W/m ²	entfällt
$h'_{net,c}$	konvektiver Anteil der Wärmestromdichte	W/m ²	entfällt
$h'_{net,r}$	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	Masse des Rauchgases innerhalb des Raumes	kg	entfällt
m	m-Faktor (Lagerart, -dichte)	-	
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
\dot{m}_{p_l}	Massenstrom des Plumes in der Höhe z	kg/s	entfällt
p	Druck im Raum	Pa	entfällt
p	Versagenswahrscheinlichkeit	-	entfällt

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
p_f	Zielversagenswahrscheinlichkeit	-	entfällt
p_{fBA}	bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall	-	entfällt
p_{BA}	Brandausbreitungswahrscheinlichkeit	-	entfällt
Δp	Druckdifferenz	Pa	entfällt
q	Brandlastdichte	MJ/m ²	entfällt
q	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	s	entfällt
t	Branddauer	min	entfällt
t_{act}	Sprinklerauslösezeit	s	entfällt
t_{act}	Zeitpunkt nach Brandbeginn, zu dem die erste Sprinklerdüse öffnet	s	entfällt
$t_{\ddot{a}}$	äquivalente Branddauer	min	entfällt
t_{con}	Zeitpunkt der Brandkontrolle	s	entfällt
t_g	Brandentwicklungszeit	s	entfällt
t_g	Branddauer bis zum Erreichen einer Brandstärke von 1 MW	s	entfällt
t_{sup}	Zeitpunkt der Brandeindämmung	s	entfällt
t_{Brand}	Branddauer	min	entfällt

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
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	-	entfällt
x, y, z	Raumkoordinaten	m	entfällt
z	Höhe des Plumes oberhalb der Brandherdgrundfläche	m	entfällt
z	Differenz zwischen Deckenhöhe und Brandherdhöhe	m	entfällt
z	vertikaler Abstand der Brandherdoberfläche zum Berechnungsort	m	entfällt
z_0	Rauhigkeitsparameter		entfällt
z_s	Höhe der Rauchschnittuntergrenze	m	entfällt
$z_{1,1}$	Distanz des realen Brandherdes zur Grenzfläche zwischen oberer und unterer Schicht	m	entfällt
$z_{1,2}$	Abstand der „virtuellen Wärmequelle“ zur Grenzfläche zwischen oberer heißer Rauchgasschicht und Kaltgasschicht	m	entfällt

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
$A_d(t)$	Bemessungswert der indirekten Einwirkungen	-	entfällt
A_f	Fläche	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_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	m^2/g	entfällt
E	innere Energie des Rauchgases im Raum	kJ	entfällt
$E_{d,fi,t}$	Bemessungswert der Einwirkungen nach EC 1 Teil 1	-	entfällt
F_s	spezifischer Personenstrom	P./s·m	entfällt
G_k	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen	-	entfällt
H	Abstand Brandherd-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

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
H_u	unterer Heizwert der brennbaren Stoffe 1 kWh = 3.600 kJ	kJ/kg od. kWh/kg	entfällt
K	Extinktionskoeffizient	m ² /g	entfällt
K_m	Rauchpotential (bezogen auf K)	m ² /g	entfällt
K_s	spezifische Absorptionsfläche	m ² /g	entfällt
M	Menge / Masse	kg	entfällt
P	Nutzeranzahl	-	entfällt
Q	Wärmefreisetzungsrate	kW od. MW	entfällt
Q	aktuelle Wärmefreisetzung auf der Brandfläche A_{Brand} zum Zeitpunkt t_{Brand}	kW	entfällt
$Q(t)$	Wärmefreisetzungsrate	kW	entfällt
$Q(t_{\text{act}})$	Wärmefreisetzungsrate beim Öffnen der ersten Sprinklerdüse (t_{act})	kW	entfällt
Q_c		kW	entfällt
$Q_{k,1}$	charakteristischer Wert einer (des Leitwertes der) veränderlichen Einwirkung	-	entfällt
$Q_{k,i}$	charakteristischer Wert weiterer veränderlicher Einwirkungen	-	entfällt
Q_{LK}	Maximum der Energiefreisetzungsrate im löschanlagenkontrollierten Fall	MW	entfällt
Q_{FO}	Brandleistung, bei der ein Flash-over eintritt	kW	entfällt
Q_R	Energieverlust aufgrund von Strahlung	kW	entfällt
$\max Q_{\text{Vent}}$	maximale Brandleistung in kleinen Räumen mit begrenzter Zuluftöffnung	kW	entfällt
\dot{Q}	Wärmefreisetzungsrate	kW	entfällt
\dot{Q}	Energiefreisetzungsrate	kW	entfällt

Anhang 1 Bezeichnungen und Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
\dot{Q}	Energiefreisetzungsrate des realen Brandherdes	kW	entfällt
\dot{Q}_c	konvektive Wärmeleistung	kW	entfällt
\dot{Q}^*	dimensionslose Wärmefreisetzungsrate	-	entfällt
$\dot{Q}_{l,1}^*$	dimensionslose Energiefreisetzungsrate des realen Brandherdes	-	entfällt
$\dot{Q}_{l,2}^*$	dimensionslose Energiefreisetzungsrate 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 Energiefreisetzungsrate bewirkt	kg/s	entfällt
S	die Einwirkung beschreibende Zustandsvariable	-	entfällt
T	Temperatur	K	entfällt
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

Symbol	Bedeutung	Einheit	ggf. Wert
T_s	Rauchgastemperatur	°C	entfällt
$T_{D,t}$	Sprinklertemperatur zum Zeitpunkt t	°C	entfällt
$T_{\text{Heißgas}}$	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
V	Verdünnungsverhältnis (= C_0/C)	-	entfällt
V_{is}	Mindestsichtweite	m	entfällt
V_l	Volumen der Luftschicht	m ³	entfällt
V_s	Volumen der Rauchgasschicht	m ³	entfällt
V_{Hyp}	Verstärkungsfaktor zur Abschätzung des Effektes der Hyperventilation		entfällt
Winkel _{Ausbreitung}	Winkel der Brandausbreitung	Grad	360
X_k	charakteristische 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 ANWENDUNGSBEISPIELE