

WP1 : Thermische & mechanische Einwirkungen

L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre

PROFILARBED S.A, Esch/Alzette, Grand-Duchy of Luxembourg

ZUSAMMENFASSUNG: In den letzten 25 Jahren wurde in zahlreichen ECSC-Projekten **Wissen im Brandschutzingenieurwesen** angesammelt. Das Ziel dieses Vorhabens ist es, dieses Wissen in so viele Länder und Sprachen wie möglich zu verbreiten.

Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich mit den **thermischen und mechanischen Einwirkungen** im Brandfall auf der Grundlage der aktuellen Eurocodes.

1 EINLEITUNG

Aufgrund einer Reihe von Brandereignissen mit zum Teil verheerenden Auswirkungen, wie z.B. der Brand in dem Supermarkt „Innovation“ in Brüssel (Belgien) mit mehr als 300 Todesopfern und der Brand in der Diskothek „Le cinq Sept“ in Saint-Laurent-du-Pont (Frankreich), wurden in den sechziger Jahren in ganz Europa neue Brandschutzbestimmungen erlassen.

Die derzeit gültigen Bestimmungen beziehen sich im Wesentlichen auf:

- Fluchtwege: Normen enthalten Vorgaben zur Anzahl der Notausgänge, der Ausführung der entsprechenden Beschilderung, der Anzahl der Treppenhäuser, der Türbreite, usw.
- Die Brandentwicklung, einschließlich „Feuerbeständigkeit“ und „Brandverhalten“
- Die Feuerwiderstandsfähigkeit des Bauwerks, angegeben als Feuerwiderstandsdauer R30, 60, 90 oder 120
- Rauchgas- und Wärmeabzugssysteme
- Aktive Brandbekämpfungsmaßnahmen, wie Handfeuerlöcher, Rauchmelder, Sprinkler.
- Bedingungen für den Feuerwehreinsatz.

Obwohl die Absicht und der Sinn des Brandschutzes in ganz Europa gleich sind, so sind die Anforderungen an ihn dennoch unterschiedlich. Dies wurde im Zuge des Projektes NFSC1 [11] analysiert und wurde aufgrund gesammelter Daten des ECSC-Projektes „Risk Based Fire Requirements“ [18] aktualisiert. So werden z.B. bei einem einstöckigen Gebäude in Spanien eine Feuerwiderstandsklasse von bis zu R 120, in der Schweiz jedoch keine Brandschutzmaßnahmen gefordert [18]. Bei einem Bürogebäude mittlerer Höhe besteht in den Niederlanden die Anforderung an die Feuerwiderstandsklasse R 60, in Frankreich R 120 [11]. Wesentliche Parameter sind hierbei die Gebäudehöhe und die Gebäudenutzung (d.h. sowohl die Anzahl der Nutzer wie auch die Art der Nutzung). Brandschutzbestimmungen sollten von den Parametern ausgehen, die die Brandentstehung und -entwicklung beeinflussen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um:

- Brandgeschehen (Wahrscheinlichkeit eines Brandereignisses, Brandübertragung, Branddauer, Brandlast (Volumen und Verteilung), Brandintensität (Energiefreisetzungsrate))
- Be- und Entlüftung
- Brandabschnitt (Art, Größe, Geometrie)
- Art des Bauteils
- Rettungsmöglichkeiten
- Sicherheit für die Rettungsmannschaften
- Risiko für angrenzende Gebäude
- Aktive Brandbekämpfungsmaßnahmen

Der Einfluss von Sprinkleranlagen, d.h. die Möglichkeit, das Entstehen eines Brandes durch Sprinkler zu verhindern oder ein bereits ausgebrochenes Feuer zu löschen, wird von den geltenden Bestimmungen nicht ausreichend berücksichtigt. Die gesammelten Daten in [11, 18] zeigen, dass die derzeit gültigen Bestimmungen, von wenigen Ausnahmen abgesehen, keinen Unterschied zwischen dem Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Sprinklern machen. Um die physikalischen Parameter systematisch zu berücksichtigen, wurde im Laufe von verschiedenen auf dem „Naturbrandkonzept“ basierenden ECSC-Projekten [11, 12, 13, 18], ein realistischer und zuverlässiger Ansatz zur Analyse der Tragwerkssicherheit im Brandfall entwickelt. Dieses Verfahren basiert auf statistischen, probabilistischen und deterministischen Ansätzen und Analysen, und ist auf sämtliche Materialien und Gebäude anwendbar.

Abbildung 1.1 vergleicht „natürliche“ Brandkurven für unterschiedliche Szenarien (Größe des Brandabschnitts, Brandlast, Wandisolierung, Abbrandverhalten, usw.) mit der ISO-Normbrandkurve.

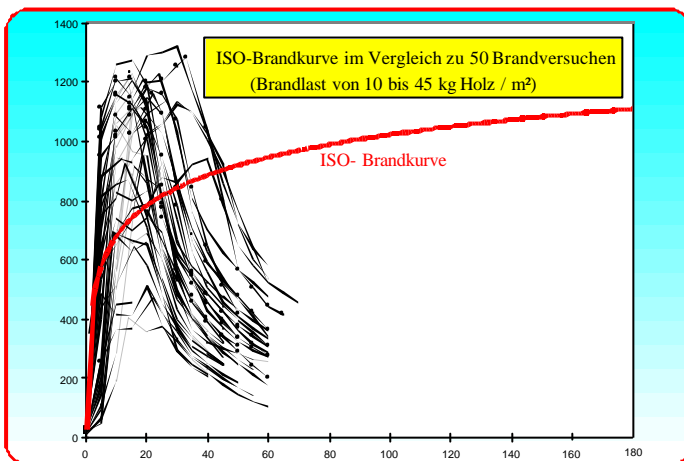


Abb. 1.1: Brandkurven für Naturbrände und ISO-Brände

Es wird deutlich, wie schwer sich das Bauteilverhalten im Brandfall auf der Grundlage der ISO-Normbrandkurve abschätzen lässt. Ein tatsächlicher Brand weist Eigenschaften auf, die diese Brandkurve nicht berücksichtigt. Zu den Besonderheiten eines Brandes zählen folgende, in Abbildung 1.2 dargestellte Faktoren:

- Eine Schwelbrandphase: Die Dauer von Entzündung und Schwelbrand bei sehr niedrigen Temperaturen ist oft schwer abzuschätzen. Diese Phase ist in Abbildung 1.2 nicht dargestellt.
- Eine Brandentstehungsphase (örtlich begrenzter Brand vor Flash-over): die Dauer dieser Phase hängt im Wesentlichen von der Beschaffenheit des Brandabschnitts ab. Der Brand bleibt bis zum Eintreten eines eventuellen Flash-over örtlich begrenzt.
- Flash-over: Nach dem Flash-over liegt ein allgemeiner Brand vor. Diese Phase ist normalerweise sehr kurz.
- Post-Flash-over-Phase: diese Phase entspricht einem allgemeinen Brand; ihre Dauer ist von der Brandlast und den Ventilationsbedingungen abhängig.
- Eine Abkühlphase: die Feuerintensität nimmt ab, bis das gesamte brennbare Material vollständig verbrannt ist.

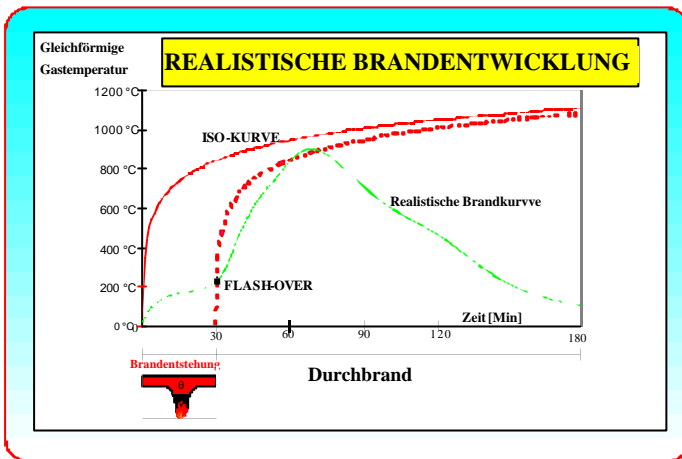


Abb. 1.2: Naturbrandphasen

2 METHODIK

2.1 Allgemeines

Um die Brandentwicklung innerhalb eines Brandabschnitts ermitteln zu können, muss eine Vielzahl von Parametern bekannt sein. Einige dieser Parameter sind durch die spezifischen Gebäudeeigenschaften festgelegt. Das Hauptmerkmal eines Brandes, die „Brandlast“, ist jedoch im Allgemeinen von der Gebäudenutzung abhängig und kann sich während der Nutzungsdauer eines Gebäudes ändern. Die Brandlast lässt sich somit als statistische Verteilung definieren. Für die Tragfähigkeitsbemessung bei Umgebungstemperatur werden auch die mechanischen Lasten, wie Eigengewicht, Auflast, Windlast usw., nach einer statistischen Verteilung definiert.

Auf dem gleichen Weg wurde die Brandsicherheit eines Gebäudes mit Hilfe eines probabilistischen Ansatzes bestimmt. In dem umfassenden Sicherheitskonzept für Naturbrände wird das Schutzziel über einen Versagensgrenzwert definiert. Es ist nicht beabsichtigt, den durch die beschreibenden Regelwerke gegebenen Sicherheitsstandard zu ändern, sondern zu einem realistischen Wert zu gelangen. Ein angemessenes Sicherheitsniveau kann durch die Kombination von aktiven und passiven Maßnahmen erreicht werden.

Eine Sicherheitsquantifizierung geht im Allgemeinen von der zur Tragfähigkeitsbemessung bei Umgebungstemperatur herangezogenen Methode aus. Unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit eines Brandes und des Einflusses aktiver Brandbekämpfungsmaßnahmen wird auf diesem Weg eine rechnerische Brandbelastung definiert.

Ausgehend von der rechnerischen Brandbelastung wird dann mit Hilfe von Rechenmodellen das Bauwerksverhalten im Brandfall bestimmt. Es werden Modelle beschrieben, mit deren Hilfe die Temperatur innerhalb eines Brandabschnitts und in den Bauteilen ermittelt werden kann.

2.2 Zielsetzung

Das Ziel besteht darin, einen akzeptablen Sicherheitsstandard zu erreichen. Dieser lässt sich durch einen Vergleich mit anderen, lebensgefährlichen Risiken definieren, wie zum Beispiel dem Einsturz eines Gebäudes unter normalen Bedingungen. Die Zielwahrscheinlichkeit, mit der es zu einem Bauteilversagen unter normalen Bedingungen kommt ist $7,23 \cdot 10^{-5}$ je Gebäudenutzungsdauer. Das Schutzziel definiert sich wie folgt: P_f (Versagenswahrscheinlichkeit) $\leq P_t$ (Zielwahrscheinlichkeit).

Gemäß Eurocode-Definition ist ein Brand ein Zufallsereignis. Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines Brandereignisses wurden umfangreiche statistische Untersuchungen durchgeführt. Die Entstehung eines Brandes ist abhängig von der Gebäudenutzung. Für die aus den unterschiedlichen europäischen Staaten stammenden statistischen Daten wurde eine gute Übereinstimmung festgestellt. Nach Ausbruch eines Feuers kann es nur dann zu einem Bauwerksversagen kommen, wenn sich das Feuer zu einem Brand größeren Ausmaßes entwickelt. Deshalb ist es wichtig, Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines solchen Branderei-

gnisses machen zu können. Aktive Brandbekämpfungsmaßnahmen sowie das Eingreifen der Gebäudenutzer und der Feuerwehr spielen in der ersten Phase eines Brandes eine große Rolle, da so in vielen Fällen ein Brand schnell gelöscht und eine Ausbreitung verhindert werden kann. Wie statistische Daten belegen, entscheiden die bei der Bauwerksplanung berücksichtigten aktiven Maßnahmen der Brandbekämpfung und das Eingreifen der Feuerwehr über die Wahrscheinlichkeit eines Großbrandes. Je nach aktiven (Sprinkler, Feuermelder) und passiven Maßnahmen (Einteilung in Brandabschnitte), dem Gebäudebeitrag sowie einem Feuerwehreinsatz wird so aus der Zielwahrscheinlichkeit eine rechnerische Brandbelastung ermittelt. Dieses globale Sicherheitskonzept wird in Kapitel 5 entwickelt und näher erläutert.

2.3 Berechnung der Brandentwicklung

Für die Berechnung der Brandentwicklung stehen Modelle auf unterschiedlichen Differenzierungsstufen zur Verfügung:

- Einfache Modelle: im Wesentlichen Parameterbrände, die für die Berechnung in einer frühen Planungsphase herangezogen werden können.
- Zonenmodelle: in diesen Modellen werden alle wesentlichen, das Brandgeschehen beeinflussenden Parameter berücksichtigt.
- Feldmodelle: da sie als allgemeines Bemessungsinstrument zu aufwendig sind, sollten sie auf spezielle Fälle begrenzt bleiben. Feldmodelle sind die einzigen für aufwendige Geometrien zu verwendenden Werkzeuge [19].

Die Annahmen des Einzonenmodells beziehen sich auf einen allgemeinen Brand mit einheitlicher Temperatur innerhalb des Brandabschnitts, während das Zweizonenmodell eine von einem begrenzten Brandherd ausgehende Rauchgasschichtung berücksichtigt. Der für die Brandentwicklung entscheidende Parameter ist die Energiefreisetzungsrate (RHR). Diese ist abhängig von der Größe des Brandabschnitts, der Nutzungsart und der Zeit. Der Brand ist vor dem Flash-over ein lokaler Brand. Die Brandentwicklung zu Beginn dieser Phase lässt sich über einen t^2 -Ansatz quantifizieren, was bedeutet, dass die Energiefreisetzungsrate mit Hilfe einer parabolischen Gleichung beschrieben werden kann. Gebäude werden je nach der Geschwindigkeit der Brandausbreitung (niedrig, durchschnittlich, schnell und sehr schnell) in 4 Kategorien eingeteilt. Die Energiefreisetzungsrate erreicht einen Höchstwert, der einem durch das Brandgut oder die Ventilationsbedingungen bestimmten stationären Zustand entspricht.

Eine mögliche Abschätzung geht davon aus, dass die Entwicklung der Energiefreisetzungsrate bekannt ist und somit bestimmt werden kann, ob es zu einem Flash-over kommt oder ob das Feuer örtlich begrenzt bleibt. Wenn es nicht zum Flash-over oder einem allgemeinen Brand kommt, bleibt das Feuer örtlich begrenzt. In diesem Fall werden die Auswirkungen der Rauchgasschicht über ein Zweizonenmodell abgeschätzt. Zusätzlich werden die Auswirkungen in Brandherdnähe mit Hilfe der aus einem früheren Forschungsprojekt ('natural fire in large compartments' [8]) gewonnen empirischen Modelle untersucht. Auf der Grundlage der von Hasemi [17] durchgeführten experimentellen Untersuchungen, die eine Bestimmung der lokalen thermischen Einwirkungen ermöglichen, wurde eine vereinfachte Methode entwickelt. Beide Modelle zusammen können wiederum zur Ermittlung des Temperaturfeldes im brandherdnahen und brandherdfernen Bereich herangezogen werden.

2.4 Tragverhalten im Brandfall

Ausgehend von dieser thermischen Beanspruchung ist der Wärmeübergang in das Bauwerk zu berechnen. Hierfür stehen unterschiedlich differenzierte Modelle zur Verfügung. Auch für das Tragverhalten, das aus dem Temperaturfeld im Bauwerk und dem Zusammenwirken der mechanischen Beanspruchung im Brandfall ermittelt wird, können Modelle unterschiedlicher Differenzierung genutzt werden.

Vereinfachte Modelle beruhen auf Element-/Elementberechnungen. Sie gehen im Allgemeinen von der Annahme einer kritischen Temperatur aus. Bleibt die Erwärmungstemperatur unter der kritischen Temperatur, kommt es nicht zum Bauwerksversagen. Der Versagensfall tritt erst dann ein, wenn die Erwärmungstemperatur die kritische Temperatur überschreitet. Dies bedeutet, dass hier ein „Entweder/Oder“-Grundsatz zur Anwendung kommt. Das Ziel des Funktions-

erhalts ist dann erreicht, wenn die Zeit bis zum Bauwerksversagen länger ist als die Dauer eines Naturbrandes.

Aufwendigere Modelle gehen beispielsweise von der Methode der Finiten Elemente aus und liefern Aussagen über das Verformungsverhalten im Verlauf des gesamten Brandgeschehens. In einigen Fällen lassen sich die Funktionskriterien (zur Feststellung, wann Schutzziele erreicht sind) über Verformungen definieren.

Bei Kenntnis des Tragverhaltens im Brandfall ist eine Bewertung anhand unterschiedlicher Funktionskriterien, wie Verformungsgrenzen oder Bauwerksschäden möglich.

Eine Festlegung der Funktionskriterien ist abhängig von den Auswirkungen eines Versagens und der Funktion des Gebäudes. Für bestimmte mehrgeschossige Gebäude kann dies bedeuten, dass es während eines Brandes zu keinerlei Bauwerksschäden kommen darf.

Die charakteristischen Merkmale dieser Modelle werden in Kapitel 7 entwickelt.

2.5 Erforderliche Daten

Die beschriebene Methodik setzt voraus, dass die Gebäudemerkmale bekannt sind. Da bei dieser Methode jeder Brandabschnitt für sich untersucht wird, muss dieser definiert werden und zwar nicht nur hinsichtlich seiner Geometrie, sondern auch in Bezug auf die thermischen Eigenschaften der Wände, die einen großen Teil der bei einem Brand freigesetzten Energie aufnehmen und weiterleiten können, sowie die Öffnungen, über die ein Luftaustausch nach außen erfolgen kann. Hiermit befasst sich Kapitel 3.

3 EIGENSCHAFTEN VON BRANDABSCHNITTEN

3.1 Allgemeines

Das „Brandsicherheitskonzept unter Berücksichtigung von Naturbrand“ geht von einer physikalisch bestimmten thermischen Beanspruchung aus. Im Gegensatz zur Regelbemessung, kommt hier den Parametern Brandlast, Energiefreisetzungsrate und Ventilation eine wesentliche Rolle zu. Da jedoch in den meisten Gebäuden die Anzahl der möglichen Brandereignisse gegen unendlich geht, muss hier eine Einschränkung vorgenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich die „glaubhaften worst-case Brandereignisse“ untersucht. Mit der Auswahl der Normbrandereignisse steht eine Reihe von Brandmodellen für die Berechnung der thermischen Beanspruchung zur Verfügung.

3.2 Brandraum und Umfassungsbauteile

Das Brandsicherheitskonzept unter Berücksichtigung von Naturbrand beschreibt die Brandentwicklung innerhalb des Brandabschnitts. Hierbei wird von der Annahme ausgegangen, dass keine weiteren Brandabschnitte vom Feuer erfasst werden. Ob dies tatsächlich so zutrifft, hängt vom Verhalten der Umfassungsbauteile (Decken, Wände (einschließlich Türen) usw.) im Brandfall ab.

Eine Einschätzung der Funktion dieser Bauteile als Brandbegrenzung setzt ausreichende Kenntnisse über ihr Brandverhalten voraus.

Folgende Wege sind denkbar:

- Ad-hoc-Versuche: Das Bauteil wird einem Normbrand in einem Brandofen ausgesetzt, wobei die entsprechende Normbrandkurve mit Hilfe von auf worst-case-Brandereignissen basierenden Brandmodellen ermittelt wurde.
- Gutachten: Hierbei wird von Versuchsdaten ausgegangen, die aus Normbrandversuchen an raumabschließenden Bauteilen zur Verfügung stehen.
- Direkte Übernahme von normativen Anforderungen: Nationale Richtlinien definieren Brandabschnitte mit Wänden, Decken und Türen entsprechend der Normbrandklassifikation nach Nutzung und Geometrie des Gebäudes.

Die beiden ersten Möglichkeiten sind auf eine begrenzte Anzahl von Raumabschlüssen anwendbar, bedeuten jedoch einen hohen Kostenaufwand. In der Praxis muss oft auf die 3. Möglichkeit zurückgegriffen werden.

3.3 Wände: thermische Merkmale

Wärmeverluste über die den Brandabschnitt begrenzenden Bauteile sind ein wichtiger Faktor bei der Temperaturbestimmung. Da die Wärme infolge von Konvektion oder Wärmestrahlung über die Wand abgeleitet wird, müssen die thermischen Eigenschaften der Wand bekannt sein.

Drei Hauptparameter bestimmen die thermischen Eigenschaften eines Materials:

- die Wärmekapazität c_p
- die Dichte r
- die Leitfähigkeit I

Die Leitfähigkeit und die Wärmekapazität sind temperaturabhängig.

Vereinfachte Modelle berücksichtigen nur die Wärmeträgheit, auch **b**-Faktor genannt. Der **b**-Faktor wird mit Hilfe der folgenden Gleichung aus den thermischen Eigenschaften bestimmt:

$$b = \sqrt{I \cdot r \cdot c_p} \quad (3.1)$$

Zur Berechnung des **b**-Faktors kann die Dichte r , die Wärmekapazität c_p und die Leitfähigkeit I des Umfassungsbauteils unter Raumtemperatur angenommen werden [1].

Bei Mehrstoffwänden ist der **b**-Faktor wie folgt herzustellen:

- Wird für ein Material (2) ein schwerer Isolierstoff (1) verwendet, dann gilt $b_1 < b_2$ und der **b**-Faktor ist der **b**-Faktor des Materials 1: $b = b_1$.
- Ist aber $b_1 > b_2$, kann eine Grenzstärke für das Material 1 entsprechend

$$s_{1,lim} = \sqrt{\frac{t_d I_1}{c_1 r_1}} \text{ festgelegt werden, wobei } t_d \text{ die Branddauer bis zur Abkühlphase ist.} \quad (3.2)$$

Der **b**-Faktor wird dann wie folgt ermittelt:

$$\text{Wenn } s_1 > s_{1,lim}, \text{ dann } b = b_1$$

$$\text{Wenn } s_1 < s_{1,lim}, \text{ dann } b = \frac{s_1}{s_{1,lim}} \cdot b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{1,lim}}\right) \cdot b_2$$

Den folgenden Tabellen (3.1a & b) sind die thermischen Eigenschaften der wichtigsten Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen zu entnehmen.

Tab. 3.1a Thermische Materialeigenschaften

Material	Temperatur (°C)	λ (W/m/K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg°K)
Normalbeton	20	2	2300	900
	200	1,63	2300	1022
	500	1,21	2300	1164
	1000	0,83	2300	1289
Leichtbeton	20	1	1500	840
	200	0,875	1500	840
	500	0,6875	1500	840
	1000	0,5	1500	840
Stahl	20	54	7850	425
	200	47	7850	530
	500	37	7850	667
	1000	27	7850	650
Gipsbekleidete Materialien	20	0,035	128	800
	200	0,06	128	900
	500	0,12	128	1050
	1000	0,27	128	1100

Tab. 3.1b Thermische Materialeigenschaften

Material	Temperatur (°C)	λ (W/m/K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg°K)
Dichtzement	20	0,0483	200	751
	250	0,0681	200	954
	500	0,1128	200	1052
	800	0,2016	200	1059
CaSi-Platten	20	0,0685	450	748
	250	0,0786	450	956
	450	0,0951	450	1060
	1050	0,157	450	1440
Holz	20	0,1	450	1113
	250	0,1	450	1125
	450	0,1	450	1135
	1050	0,1	450	1164
Ziegelstein	20	1,04	2000	1113
	200	1,04	2000	1125
	500	1,18	2000	1135
	1000	1,41	2000	1164
Glas	20	0,78	2700	840

3.4 Brandraumöffnungen

Bei Brandraumöffnungen kann es sich um Fenster, Türen oder Dachentlüftungen handeln. Die Stärke eines sich innerhalb eines umschlossenen Raums entwickelnden Feuers hängt von der Gesamtfläche der Öffnungen in diesem Raum ab.

Der in vereinfachten Modellen eingesetzte Öffnungsfaktor O wird mit Hilfe folgender Gleichung (3.3) für eine einzelne vertikale Öffnung definiert:

$$O = A_w \sqrt{H} \quad (3.3)$$

Müssen mehr als eine vertikale Öffnung berücksichtigt werden, ist von der Gesamtfläche und einer äquivalenten Höhe auszugehen. Diese werden bestimmt durch (3.4) und (3.5):

$$A_w = \sum A_{wi} \quad (3.4)$$

$$H = \left[\frac{\sum A_{wi} \sqrt{H_i}}{\sum A_{wi}} \right]^2 \quad (3.5)$$

wobei A_w = Öffnungsfläche, H = Öffnungshöhe und i entsprechend der Öffnungs-Nr. i .

3.5 Künstliche Belüftung

Die Verwendung von Überdruck zur Rauchfreihaltung von Treppenhäusern ist ein interessanter Ansatz zum Schutz dieser Rettungswege.

Die künstliche Belüftung wird oft in Verbindung mit Rauch- und Wärmeabzugssystemen eingesetzt.

4 BRANDCHARAKTERISTIK

Dieses Kapitel soll Planern und Konstrukteuren die im Zusammenhang mit Gebäudebränden erforderlichen Daten liefern. Für den entsprechenden baulichen Brandschutz muss zunächst definiert werden, welche Wärmeenergie möglicherweise auf das Bauwerk einwirkt. Hierzu kann in dem betreffenden Gebäude ein Brandversuch durchgeführt werden. Da dies sehr aufwendig wäre und man zudem lediglich Daten zu einem von einer Vielzahl möglicher Brände erhält, wurden die aus Brandversuchen und bereits bestehenden Modellen vorliegenden Daten zur

Brandentwicklung zusammengefasst. Auf dieser Grundlage ist es leicht möglich, Brände unter sehr unterschiedlichen Bedingungen zu charakterisieren.

4.1 Brandlast

Das erste Problem besteht in der Bestimmung der für die Bemessung anzusetzenden Brandlast, die sich nur schwer auf deterministischem Weg ermitteln lässt und deshalb im Allgemeinen statistisch bestimmt werden muss.

4.1.1 Deterministischer Ansatz

Die innerhalb eines Brandabschnitts gegebene Brandlast Q ist die Gesamtenergie, die im Brandfall freigesetzt werden kann. Ein Teil dieser Energiemenge wird bei der Erwärmung des Brandabschnitts verbraucht (Erwärmung der Wände und der Raumluft), die Restenergie gelangt über Öffnungen nach draußen. Die Brandlast setzt sich zusammen aus Bauelementen, wie Wänden und Deckenbekleidungen, sowie der Gebäudeausstattung, wie z.B. beweglichen Einrichtungsgegenständen. Durch Teilung der Brandlast Q durch die Grundfläche erhält man die Brandbelastung q_f .

Im EC 1991-1-2 wird die charakteristische Brandbelastung über folgende Gleichung definiert:

$$q_f = \frac{1}{A_f} \sum_i (Y_i \cdot m_i \cdot H_{ui} \cdot M_i) \quad (4.1)$$

mit:

M_i Masse des Materials i (kg)

H_{ui} spez. Heizwert des Materials i (MJ/kg) (siehe Tabelle 4.1)

m_i Faktor zur Beschreibung des Abbrandverhaltens des Materials i

Y_i Faktor zur Beschreibung der geschützten Brandlast des Materials i

A_f Grundfläche des Brandabschnitts [m²].

$H_{ui} \cdot M_i$ ist die im Material i enthaltene Gesamtenergie, die bei angenommener vollständiger Verbrennung freigesetzt wird. Der Faktor m ist ein dimensionsloser Faktor zwischen 0 und 1, der den Verbrennungsgrad anzeigt: $m = 1$ entspricht einer vollständigen Verbrennung; $m = 0$ gilt dann, wenn Material in keiner Weise am Brandgeschehen beteiligt ist. Für übliche Stoffe sollte $m = 0,8$ angesetzt werden. Für Holz wird ein spez. Heizwert von 17,5 MJ/kg vorgeschlagen, was 14 MJ/kg für $m \cdot H_u$ entspricht.

Tab. 4.1 Empfohlene Heizwerte H_u (MJ/kg) von brennbaren Materialien zu Berechnung der Brandlast

Feststoffe	
Holz	17,5
Andere zellulose Materialien: Kleidung Kork Baumwolle Papier, Pappe Seide Stroh Wolle	20
Karbon Anthrazit Holzkohle Kohle	30
Chemikalien	
Paraffine: Methan Ethan Propan Butan	50
Olefine: Ethylen Propylen Buten	45
Aromen: Benzol Toluen	40
Alkohole: Methanol Ethanol Ethylalkohol	30
Treibstoffe: Benzin, Kerosin Diesel	45
Reine Kohlenwasserstoff-Kunststoffe: Polyethylen Polystyren Polypropylen	40
Andere Produkte	
ABS (Kunststoff)	35
Polyester (Kunststoff)	30
Polyisocyanerat und Polyurethan (Kunststoff)	25
Polyvinylchlorid, PVC (Kunststoff)	20
Bitumen, Asphalt	40
Leder	20
Linoleum	20
Gummireifen	30
ANMERKUNG Die Werte dieser Tabelle sind für die Bestimmung des Energiegehalts von Flüssig-Brennstoffen nicht geeignet.	

4.1.2 Statistischer Ansatz

Die Brandbelastung in einem Gebäude lässt sich durch Summierung der gesamten in diesem Gebäude vorhandenen Brandlast abschätzen (deterministische Vorgehensweise). Für bestimmte

Gebäudearten, wie Büros, Schulen usw., liegen Daten zur Brandbelastung vor. Diese statistische Methode hat jedoch nur dann Gültigkeit, wenn eine vergleichbare Brandlast vorausgesetzt werden kann. In diesen Fällen kann die Brandbelastung als statistische Verteilung mit einem Mittelwert und einer Standardabweichung angegeben werden.

In Tabelle 4.2 sind diese Werte für einige Gebäudearten aufgeführt. Sie basieren auf der Gumbel-I-Verteilung. Die Werte für 80, 90 und 95% Fraktile wurden mit Hilfe dieser Verteilung bei Annahme eines Variationskoeffizienten von 0,3 berechnet. Die genannten Werte sind einer Zusammenstellung allgemein anerkannter Werte aus internationalen Veröffentlichung [2, 21, 22] entnommen.

Tab. 4.2 Brandlastdichten verschiedener Gebäudearten [MJ/m²] (basierend auf einer Gumbel-I-Verteilung).

	Standard- abweichung	Mittelwert	80% Fraktile	90 % Fraktile	95 % Fraktile
Wohngebäude	234	780	948	1085	1217
Krankenhaus	69	230	280	320	359
Hotel (-zimmer)	93	310	377	431	484
Bibliothek	450	1500	1824	2087	2340
Büro (Standard)	126	420	511	584	655
Schule	85,5	285	347	397	445
Einkaufszentrum	180	600	730	835	936
Theater (Kino)	90	300	365	417	468
Verkehr (öffentlicher Raum)	30	100	122	139	156

4.2 Brandarten

In einem nächsten Schritt ist die Frage zu beantworten, in welchem Umfang die vorhandene Brandlast am Brandgeschehen beteiligt ist und wie sich dies auf die Brandkurve auswirkt.

Ein Brand entsteht nie gleichzeitig im gesamten Brandabschnitt, es sei denn es liegt Brandstiftung vor oder der Brand ist auf eine Explosion zurückzuführen (beides geht über den Rahmen dieser Untersuchungen hinaus). Brände entstehen immer als lokale Brände und entwickeln sich in Abhängigkeit von unterschiedlichen Faktoren zu einem allgemeinen Brand.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen einem lokalen und einem voll entwickelten Brand zeigt nachstehende Übersicht:

	Brandlast	Rauchgastemperatur
Lokaler Brand	Nur ein Teil des Brandabschnitts brennt.	Zwei Zonen (zwei Brandkurven)
Voll entwickelter Brand	Die gleichmäßig über den Brandabschnitt verteilte Brandlast brennt.	Eine Zone (eine Brandkurve)

Ist der gesamte Brandabschnitt vom Brandgeschehen erfasst, wird von einer einheitlichen Gastemperatur ausgegangen. Bei einem voll entwickelten Brand brennt die gesamte Brandlast, so dass der ganze Raum mit Rauch, Verbrennungsprodukten und Luft angefüllt ist. Da sich diese Elemente stark vermischen, kann davon ausgegangen werden, dass im ganzen Raum eine homogene Gasmischung mit gleicher Temperatur vorliegt. Ein Verfahren zur Bestimmung der Temperaturzeitkurve eines lokalen oder Vollbrandes wird im Kapitel 6 vorgestellt.

4.3 Normbrand

Neben der Brandlast muss zusätzlich die Abbrandrate bekannt sein, um Aussagen über die Energiefreisetzungsrates (RHR) machen zu können.

4.3.1 Brandlast- und ventilationsgesteuerte Brände

Die Brandlast legt fest, wie viel Energie freigesetzt werden kann, die Heißgastemperatur wird jedoch durch die Energiefreisetzungsrates bestimmt. Die gleiche Brandlast kann zu ganz unterschiedlichen Gastemperaturkurven führen, je nachdem ob es zu einer sehr schnellen Verbrennung kommt oder ob es bei einem Schmelbrand bleibt.

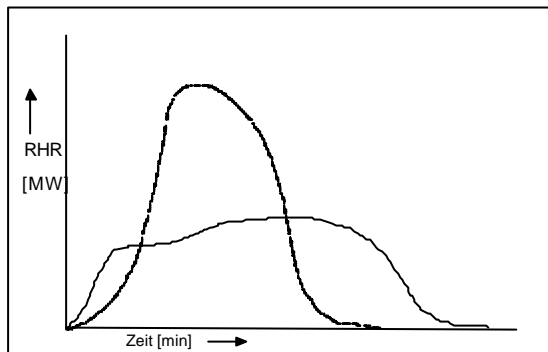


Abb. 4.1: Zwei RHR-Kurven für die gleiche Brandlastmenge, da die Fläche unter beiden Kurven gleich ist.

Die Energiefreisetzungsrates ist maßgebend für den Anstieg der Gastemperatur, und sie ist die „treibende Kraft“ hinter der Rauchgasausbreitung. Ein typischer Brand beginnt mit einem begrenzten Brandherd und durchläuft dann eine Entwicklungsphase. Danach bestehen zwei Möglichkeiten, je nach dem, ob die Sauerstoffzufuhr während dieser Phase für die Aufrechterhaltung eines Verbrennungsprozesses stets ausreichend ist. Kann sich das Feuer ohne Begrenzung der Sauerstoffzufuhr voll entwickeln, wird die Energiefreisetzungsrates entweder durch die zur Verbrennung zur Verfügung stehende Brandlast begrenzt (**brandlastgesteuerter Brand**) oder aber der verfügbare Sauerstoff begrenzt die Energiefreisetzungsrates, was dann der Fall ist, wenn die Öffnungsfläche im Brandraum für eine ausreichende Luftzufuhr zu klein ist. In diesem zweiten Fall spricht man von einem **ventilationsgesteuerten Brand**. In beiden Fällen kann es zu einem Flash-over kommen.

Diese wichtige Phase, der Flash-over, kennzeichnet den Übergang von einem lokalen Brand zu einem Brand, der alle freiliegenden brennbaren Flächen im Brandraum erfasst. Abbildung 4.2 zeigt beide Zustände. In den dargestellten Kurven ist die Abbrandrate über dem Belüftungsparameter $A_w \cdot \sqrt{h}$ aufgetragen, wobei A_w für die Öffnungsfläche steht und h für die Öffnungshöhe.

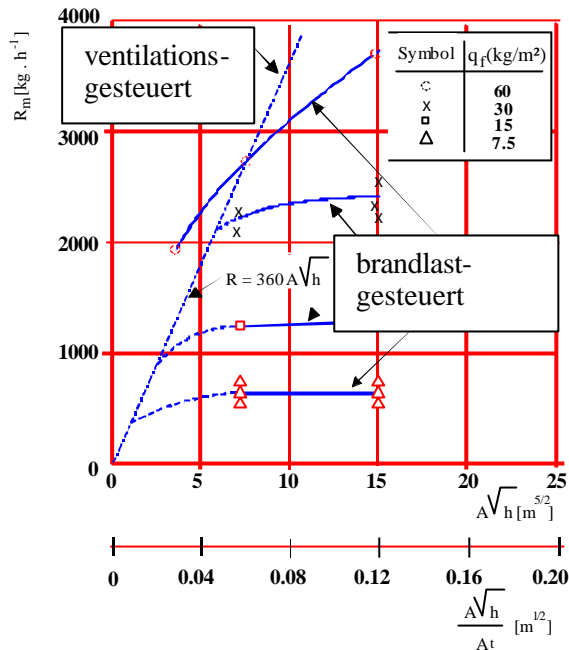


Abb. 4.2: Massenströme für unterschiedliche Brandbelastungen.

4.3.2 Energiefreisetzungsrate

Die Zunahme der Energiefreisetzungsrate bis zum Höchstwert (siehe Abb. 4.3) wird dargestellt durch:

$$RHR = (t/t_a)^2$$

mit:

- RHR Energiefreisetzungsrate des Feuers während der Entwicklungsphase (MW)
- t Zeit (s)
- t_a Zeitkonstante in Tabelle 4.3 (s)

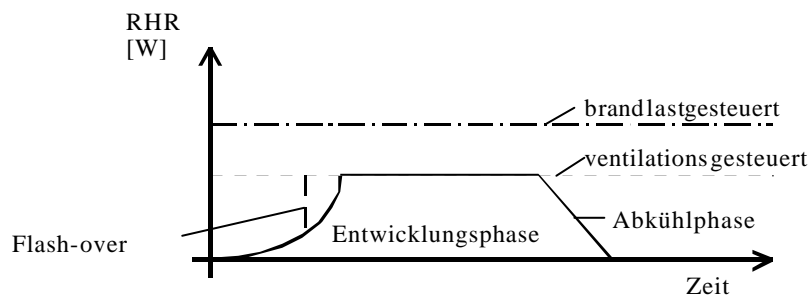


Abb. 4.3: Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Zeit: Drei Phasen sind erkennbar: Entwicklungsphase, stationäre Phase (nach Flash-over) und Abkühlphase

Es sind drei verschiedene Phasen erkennbar: Brandentstehung, stationäre Phase, Abkühlphase. Der in der Norm [1,2] angegebene Parameter für die Brandentwicklung ändert sich in Abhängigkeit von der Gebäudeart. Abbildung 4.4 enthält Anhaltspunkte für eine Parameterklassifizierung und -bestimmung.

Nach der Entwicklungsphase verläuft die Energiefreisetzungskurve auf einem gleich bleibenden Plateau, wobei das RHR-Maximum brandlastgesteuert (siehe Abbildung 4.4) oder ventilationsgesteuert sein kann.

In [1,2] und [7] wird für diese Phase ein linearer Verlauf der Energiefreisetzungsrates angenommen. Für die Berechnung des Anfangspunktes der Abkühlphase und ihre Dauer werden

Formeln angegeben. Vorliegenden Versuchsergebnissen ist zu entnehmen, dass die Abkühlphase dann einsetzt, wenn etwa 70% der gesamten Brandlast verbrannt sind.

Die folgende Abbildung 4.4 zeigt die für das NFSC-Projekt vorgeschlagene Kurve der Energiefreisetzungsrate mit den Phasen Brandentstehung, stationäre Phase, Abkühlphase.

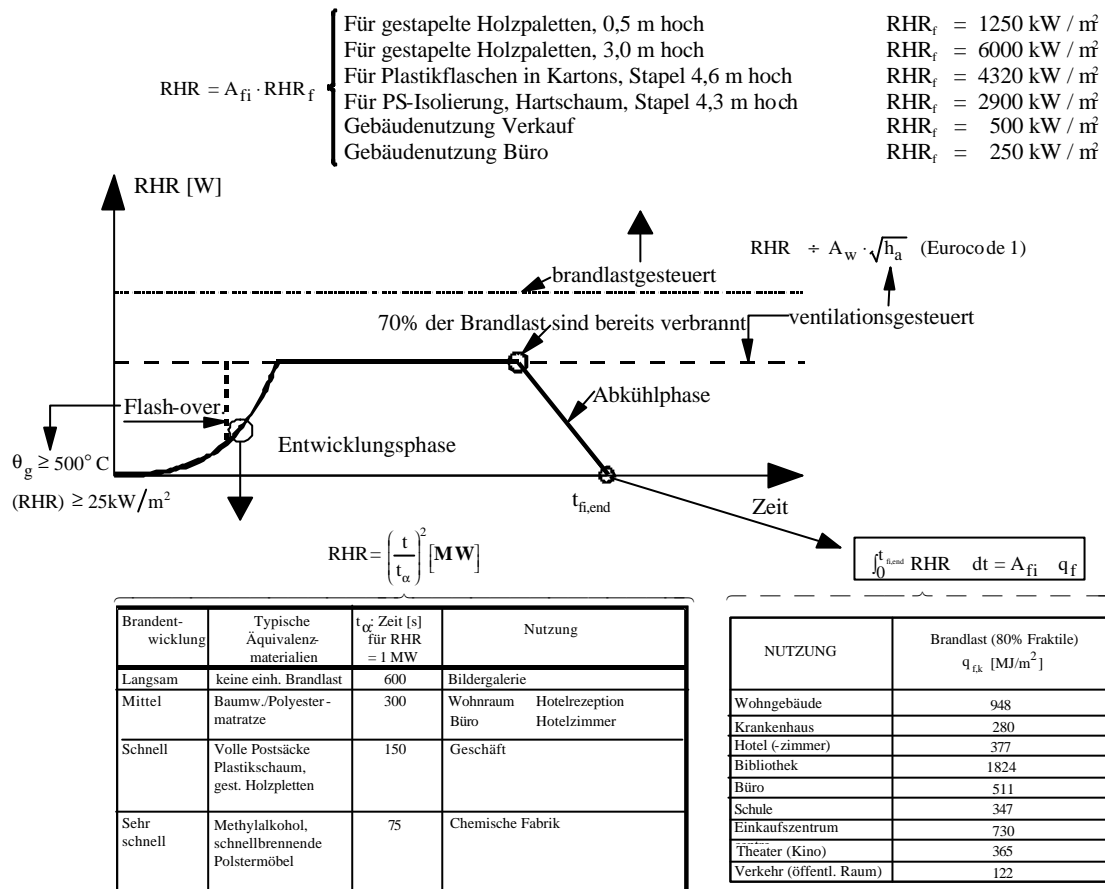


Abb. 4.4: Bemessungskurve der Energiefreisetzungsrate

4.3.3 Experimentelle Daten

Die Energiefreisetzungsrate kann auch auf experimentellem Weg ermittelt werden. Möglichkeiten zur Messung der Energiefreisetzungsrate stehen (mit Ausnahme der Kalorimeterbombe) erst seit kurzem durch die Entwicklung der Sauerstoffkalorimetrie zur Verfügung. Davor musste die fühlbare Enthalpie direkt gemessen werden, eine Methode, die nur unter Schwierigkeiten mit zufrieden stellender Genauigkeit durchgeführt werden kann. Die Sauerstoffkalorimetrie macht die erforderlichen Messungen nicht nur leicht durchführbar, sondern liefert auch ausreichend genaue Ergebnisse. Das Prinzip des Sauerstoffverbrauchs besagt, dass zwischen der bei der Verbrennung eines beliebigen, herkömmlichen Brennmaterials freigesetzten Energie und der dem Verbrennungsvolumenstrom entzogenen Sauerstoffmenge – bei nur geringen Unsicherheiten – ein unmittelbarer Zusammenhang besteht [16]. Mit Hilfe dieser Methode ist inzwischen eine Datenbank auf der Grundlage der verfügbaren Versuchsergebnisse angelegt worden. Für die Energiefreisetzungsrate liefert die verfügbare Literatur unterschiedliche Quellen [3, 4, 5, 6]. Das Zweizonenmodell Hazard [5] zur Risikosimulation enthält eine Datenbank für unterschiedliche Gegenstände u.a. mit den zugehörigen Energiefreisetzungsrate. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Haushaltsgegenstände, wie z.B. Stühle, Fernsehgeräte, Weihnachtsbäume usw. Obwohl die Anwendbarkeit durch diese Auswahl eingeschränkt bleibt, ist diese Quelle dennoch sehr nützlich, da sie jede Phase im Verlauf einer Energiefreisetzungsrate berücksichtigt. Argos [4] ist eine weitere Datenbank im Zusammenhang mit Brandsimulationsprogrammen. Diese Datenbank liefert eine Reihe von Gleichungen für Brände mit Feststoffen, Schmelzen oder Flüssigkeiten als Brandlast bzw. für Schwelbrände. In diesen Gleichungen wird die

Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Brandübertragung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung definiert. Die für unterschiedliche Materialien und Gegenstände gültigen numerischen Werte sind in der Argos-Datenbank zu finden.

Zu Versuchsergebnissen aus Brandversuchen kann auch auf das von der Universität Lund [3] erstellte Dokument „Initial Fires“ zurückgegriffen werden. Das Format entspricht dem der Hazard-Datenbank, jedoch enthält dieses Dokument mehr Ergebnisse. „Initial Fires“ liefert Informationen nicht nur für Haushaltsgegenstände, sondern beispielsweise auch für unterschiedliche Fahrzeugtypen. CTICM, Frankreich, hat Brandversuche zu neuen Fahrzeugen (Baujahr 1996) [21], Hotelzimmern und Gebrauchsmöbeln durchgeführt und die Energiefreisetzungsrates gemessen. Diese Versuchsdaten sind insofern interessant, als dass die meisten in der Literatur beschriebenen Brandversuche von Holzkrippen als Brandlast ausgehen.

5 PROBABILISTISCHER ANSATZ

5.1 Vorbemerkungen

Offensichtlich ist es weitaus wahrscheinlicher, dass ein Feuer in einer Lackiererei als in einem Schwimmbad ausbricht. Weiterhin ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Feuer ausbreitet und einen Brandraum vollständig erfasst, von der Grundfläche dieses Brandraums sowie von den aktiven Brandbekämpfungsmaßnahmen abhängig. Hierzu gehören Sprinkler, automatische Brandmelder (Rauch- oder Wärmemelder), eine automatische Übermittlung der Brandmeldung an Feuerwehreinsatzzentralen und der Eingriff der Feuerwehr.

In verschiedenen EGKS-Projekten [11, 18] wurden statistische Daten gesammelt, aus denen die Wahrscheinlichkeit abgeleitet werden kann, dass

- ein Feuer ausbricht,
- die Gebäudenutzer nicht in der Lage sind, den Brand zu löschen,
- die automatischen aktiven Brandbekämpfungsmaßnahmen (Sprinkler usw.) nicht in der Lage sind, den Brand zu löschen,
- die Feuerwehr nicht in der Lage ist, den Brand zu löschen.

Ob ein Feuerwehreinsatz erfolgreich ist, hängt in erster Linie von der Zeit ab, die vergeht, bis ein Brand entdeckt wird (automatische Rauch- oder Wärmemelder) und die Löschmannschaft am Brandort eintrifft (automatische Übermittlung der Brandmeldung sowie Entfernung zwischen Zentrale und Brandort).

Ausgehend von diesen Wahrscheinlichkeitsüberlegungen lässt sich mit Hilfe eines in EN 1990, Anhang C [10], angegebenen Verfahrens sowie über Wahrscheinlichkeitsrechnungen der $d_{q,f}$ -Faktor für die Brandlast ableiten. Diese Methode wird in Kapitel 5.4 näher erläutert.

Der Faktor $d_{q,f}$ wird zur Berücksichtigung der Brandabschnittsgröße, der Art des Gebäudes und der unterschiedlichen Brandbekämpfungsmaßnahmen in die Teilkoeffizienten d_{q1} , d_{q2} , d_{ni} unterteilt. Durch Multiplikation der charakteristischen Brandlast $q_{f,k}$ mit $d_{qf} = d_{q1} \cdot d_{q2} \cdot d_{ni}$ erhält man die rechnerische Brandlast $q_{f,d}$.

Diese rechnerische Brandlast wird dann in den Naturbrandmodellen (siehe Kapitel 6) zur Berechnung der für diese Brände geltenden Bemessungsbrandkurve eingesetzt.

5.2 Statistische Untersuchungen

Die statistischen Untersuchungen beruhen auf den Daten folgender Länder:

- Schweiz: Einzeldaten und Untersuchungen zu allen Bränden (± 40.000 Brände), die im Zeitraum von 1986 bis 1995 in Bern Schäden von mehr als 1.000.000 Sfr verursacht haben.
- Frankreich: Brände in Industriegebäuden im Zeitraum von Januar 1983 bis Februar 1984, alle Feuerwehreinsätze im Jahr 1995 (3.253.855 Einsätze, hiervon 312.910 Brandeinsätze).
- Niederlande: Brände in Industriegebäuden im Zeitraum von Januar 1983 bis Januar 1985.
- Finnland: alle Gebäudebrände im Jahr 1995 (2.109 Brände bei insgesamt 1.150.494 Gebäuden). In [18] werden zusätzlich Daten aus Finnland geliefert, die auf Daten der Nationalen Branddatenbank "PRONTO" des Innenministeriums und anderen relevanten statistischen Datenbanken für die Jahre 1996-1999 basieren.
- Luxemburg: Feuerwehrberichte zwischen 1995 und 1997.

Sowie internationale Daten unterschiedlicher Herkunft zu verschiedenen Aspekten des Brand- schutzes, wie z.B. der Effektivität von Sprinkleranlagen. Daten zum Sprinklereinsatz wurden aus Datenbanken der USA, Finnlands, Deutschlands, Frankreichs, Australiens und Großbritan- niens zusammengefasst [13].

Die nachstehenden statistischen Daten beziehen sich hauptsächlich auf Wohn-, Büro- und Indu- striegebäude. Diese Daten wurden für andere Nutzungsarten erweitert (siehe Tabelle 5.6).

5.3 Wahrscheinlichkeiten

5.3.1 Ereignisbaumanalyse

Die Brandentwicklung beginnend mit dem Ausbruch eines Feuers lässt sich mit Hilfe eines Er- eignisbaums (siehe Abb. 5.1) beschreiben, wobei die in Tabelle 5.1 vorgeschlagenen Werte in Ansatz gebracht werden.

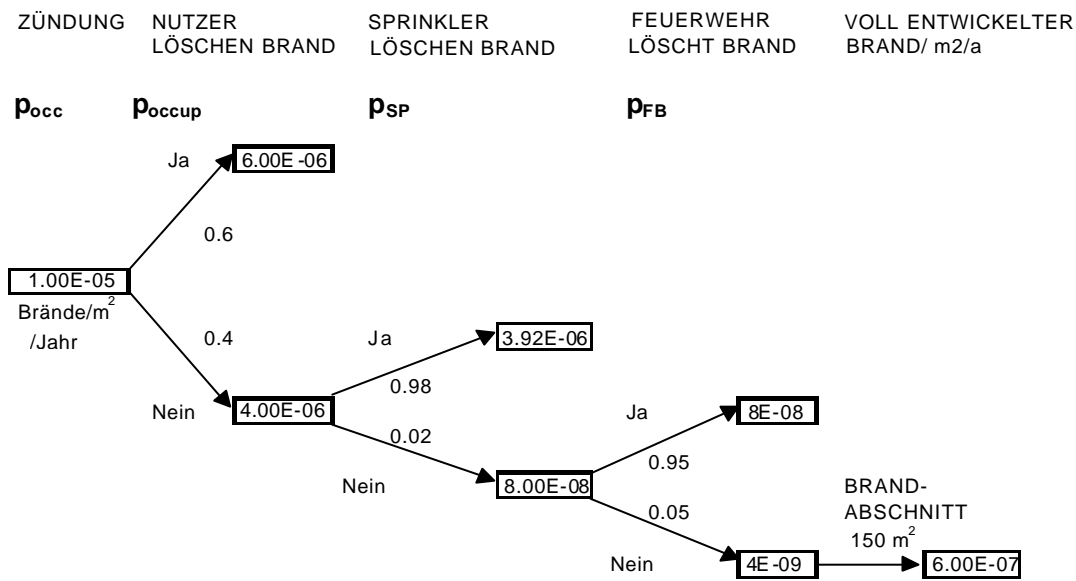


Abb. 5.1: Beispiel für einen Ereignisbaum zur Darstellung der Brandentwicklung in einem Büro mit einer Brandabschnittsfläche von 150 m²

Tab. 5.1: Ereignisbaumfaktoren

		Wohnraum	Büro	Industrie
Brandereignis [1/(m ² ·Jahr)]	p _{occ}	30 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶
Feuer durch Nutzer gelöscht	p _{occup}	0,75	0,60	0,45
Feuer durch Sprinkler gelöscht	p _{sp}	siehe Tabelle 5.5		
Feuer durch öffentliche Feuerwehr ge- löscht	p _{fb}	0,90 - 0,95	0,90 - 0,95	0,80 - 0,90

5.3.2 Eintreten eines Brandereignisses und Brandentwicklung

Die Wahrscheinlichkeit, dass es pro Jahr zu einem die Tragfähigkeit beeinträchtigenden Brand kommt, lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot A_{fi} \cdot p_4 \quad (5.1)$$

mit:

p₁ Wahrscheinlichkeit eines größeren Brandes, unter Berücksichtigung der von den Gebäude- nutzern und der Feuerwehr ergriffenen Maßnahmen (je m² Fläche und Jahr)

- p_2 Zusätzlicher Reduktionsfaktor in Abhängigkeit von der Art der öffentlichen Feuerwehr und der Zeit zwischen Brandmeldung und Eingreifen der Feuerwehr (p_2 ist gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass es der Feuerwehr nicht gelingt, den Brand zu löschen)
- p_3 Reduktionsfaktor für den Fall, dass automatischer Feueralarm (Rauch- oder Wärmemelder) und/oder automatische Weiterleitung des Alarms gegeben sind
- p_4 Reduktionsfaktor für den Fall, dass eine Sprinkleranlage vorhanden ist (p_4 ist gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass die Sprinkler nicht in der Lage sind, den Brand zu löschen)
- A_{fi} Grundfläche des Brandabschnitts

Anmerkung: Faktor p_1 berücksichtigt Maßnahmen der Gebäudenutzer und der städtischen Berufsfeuerwehr zur Verhinderung einer Brandausbreitung und darf nicht mit der Häufigkeit eines Brandereignisses verwechselt werden.

Der Einfluss der Art der Feuerwehr, der Zeit zwischen Brandmeldung und Eingreifen der Feuerwehr, automatischer Brandmeldung und automatischer Weiterleitung der Meldung (p_2, p_3) wird in Tabelle 5.1 nicht berücksichtigt; p_1 in Tabelle 5.2 entspricht $p_{occ} \cdot (1-p_{occup}) \cdot (1-p_{FB})$. Für das Brandsicherheitskonzept unter Berücksichtigung von Naturbrand werden für p_1, p_2, p_3 und p_4 folgende Werte empfohlen:

Tab. 5.2: Häufigkeit eines Feuerausbruchs und einer Brandentwicklung, einschl. Einsatz der Berufsfeuerwehr

Nutzung	p_1 [$10^{-7}/(m^2 \cdot year)$]
Büro	2 – 4
Wohnraum	4 – 9
Industrielle Nutzung	5 – 10

Tab. 5.3 : Zusätzlicher Reduktionsfaktor für Art der Feuerwehr und Zeit zwischen Brandmeldung und Eingreifen der Feuerwehr

	Zeit zwischen Brandmeldung und Eingreifen der Feuerwehr		
	$\leq 10'$	$10' < t \leq 20'$	$20' < t \leq 30'$
p_2			
Art der Feuerwehr			
Berufsfeuerwehr	0,05	0,1	0,2
Sonstige	0,1	0,2	1

Tab. 5.4 : Reduktionsfaktor für automatische Brandmeldung (Rauch- oder Wärmemelder) und automatische Übermittlung der Brandmeldung

Aktive Maßnahmen	p_3
Brandmeldung über Rauchmelder	0,0625
Brandmeldung über Wärmemelder	0,25
Automatische Übermittlung der Brandmeldung an Feuerwehreinsatzzentrale	0,25

Tab. 5.5: Reduktionsfaktor für Sprinkleranlage

Art der Sprinkleranlage	p_4
Standard (z.B. entspr. Vorschriften)	0,02
Hoher Standard (z.B. elektronische Ventilsteuerung, zwei unabhängige Wasserversorgungssysteme)	0,01 - 0,005
Niedriger Standard (z.B. nicht in Übereinstimmung mit Vorschriften)	$\geq 0,05$

5.4 Verfahren

5.4.1 Bestimmung der Bemessungswerte für Beanspruchung und Widerstand – Sicherheitsfaktor γ nach Eurocode – Prinzip für normale Nutzungsbedingungen

Der Widerstand R und die auftretende Einwirkung S entsprechen der statistischen Verteilung, die sich aus der Standardabweichung (s_S, s_R) und der mittleren Abweichung (m_S, m_R) ergibt. Um eine ausreichende Sicherheit gewährleisten zu können, darf es nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit p_f zum Versagen ($S > R$) kommen, wie durch den schraffierten Bereich in Abb. 5.2 dargestellt. Dieser Bereich kann mit Hilfe des Sicherheitsindex b gemessen werden.

Im Eurocode ist für übliche Nutzungsbedingungen eine maximale Versagenswahrscheinlichkeit p_t von $7,23 \cdot 10^{-5}$ für die Gebäudenutzungsdauer vorgegeben; dies entspricht einem Sicherheitsindex b_t von 3,8.

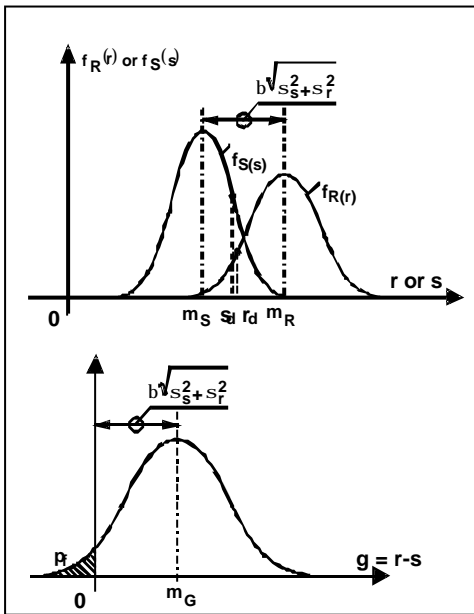


Abb. 5.2 Probabilistischer Ansatz

$$p_f \leq p_t (= 7,23 \cdot 10^{-5}) \rightarrow b > b_t (= 3,8)$$

$$m_R - m_S \geq b \sqrt{s_S^2 - s_R^2} = b \frac{s_S^2 - s_R^2}{\sqrt{s_S^2 - s_R^2}}$$

$$\Rightarrow m_R - \frac{s_R}{\sqrt{s_S^2 - s_R^2}} b s_R \geq m_S - \frac{s_S}{\sqrt{s_S^2 - s_R^2}} b s_S$$

$$\Rightarrow r_d \geq s_d$$

Die beiden Variablen s_d und r_d entsprechen den Bemessungswerten von S (Einwirkung) und R (Widerstand)

Da jedoch von unterschiedlichen Beanspruchungen (Eigengewicht, Wechsellast, Schnee- und Windlast, seismische Beanspruchung, Feuer) und unterschiedlichen Widerständen (Druckfestigkeit des Betons, Streckgrenze des Stahls in den Profilen und der Bewehrung usw.) auszugehen ist, lässt sich das Problem nicht über einen einfachen Vergleich zweier statistischer Variablen darstellen. Der Eurocode beschreitet deshalb einen semiprobabilistischen Weg, der auf der FORM-Methode (First Order Reliability Method) beruht.

Diese Vereinfachung des Eurocodes geht von folgenden Annahmen aus:

$$a_R = \frac{s_R}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} = 0,8 \text{ für den Widerstand} \quad (5.2)$$

$$a_S = \frac{s_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} = (-0,7) \text{ für die Primärbeanspruchung und} \\ (-0,28) \text{ für die Sekundärbeanspruchung} \quad (5.3)$$

$$\Rightarrow s_{d,i} = \text{DesignValue} = m_{S,i} + 0,7 b s_{S,i}$$

$$\Rightarrow r_{d,i} = \text{DesignValue} = m_{R,i} - 0,8 b s_{R,i}$$

Wenn die Wichtungsfaktoren $\mathbf{a}_{s,i}$ als konstant angenommen werden, können die Bemessungsfaktoren $s_{d,i}$ für Beanspruchungen ohne Berücksichtigung des Widerstands definiert werden, da diese Bemessungswerte lediglich vom Sicherheitsindex \mathbf{b} , der mittleren und der Standardabweichung der entsprechenden statistischen Verteilung und natürlich von der Art der Verteilung abhängen (siehe Formeln in Abb. 5.2 [10]). Diese Bemessungswerte $s_{d,i}$ der Beanspruchungen sind somit die Beanspruchungswerte, die für die erforderliche Sicherheit zu berücksichtigen sind. Wenn $\mathbf{b} = 3,8$, wie im Eurocode vorausgesetzt, heißt dies, dass die Versagenswahrscheinlichkeit im Verlauf der Gebäudenutzungsdauer $7,23 \cdot 10^{-5}$ entspricht.

Hieraus folgt, dass für jede Beanspruchung ein Sicherheitsbeiwert \mathbf{g} definiert werden kann, der sich aus dem Bemessungswert s_d und dem Kennwert, d.h. dem üblichen Bezugswert, ergibt:

$$\mathbf{g} = \left(\frac{s_d}{s_k} \right) \quad (5.4)$$

Die im Eurocode angegebenen Sicherheitsbeiwerte lassen sich so wie folgt ermitteln: bei den Beanspruchungen 1,35 und 1,5 für das Eigengewicht und die Verkehrslast; bei den Widerständen 1,1, 1,15 und 1,5 für Baustahl, Bewehrung und Beton [1, 16, 20, 24].

Als Rechenbeispiel nachstehend die Berechnung von \mathbf{g}_t gleich 1,1 für Baustahl.

– $\beta = 3,8$; $\mathbf{a}_a = 0,8$

Statistisches Gesetz : Lognormal

– Variationskoeffizient $\left(= \frac{\mathbf{s}}{m} \right)$:

$V_R = \text{Variationskoeffizient für den Bemessungswert} =$ $= 0,087$

$V_m = \text{Variationskoeffizient für die Modellunsicherheiten} = 0,05$

$V_G = \text{Variationskoeffizient für die Elementgeometrie} = 0,05$

$V_f = \text{Variationskoeffizient für die Festigkeitseigenschaften} = 0,05$

– Bemessungswert: $X_d = m_X \exp(-\mathbf{a}_R \mathbf{b} V_R)$
 $= m_X \exp(-0,8 \mathbf{b} V_R)$

– Kennwert: $X_k = m_X \exp(-k V_f)$
 mit $k = 1,645$ entsprechend der 5 % Fraktile

– Sicherheitsfaktor: $\mathbf{g} = \frac{X_k}{X_d} = \exp(0,8 \mathbf{b} V_R - k V_f)$
 $= \exp(0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,087 - 1,645 \cdot 0,05)$
 $= 1,198$

5.4.2 Zielwerte

Die Annahme einer Zielversagenswahrscheinlichkeit p_t von $7,23 \cdot 10^{-5}$ je Gebäudenutzungsdauer ($1,3 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr) wird in EN 1990 [10] definiert. Die Sicherheitsanforderungen ($\mathbf{b} > 3,8$) für den Grenzzustand der Tragsicherheit unter normalen Bedingungen wurden auch als Abnahmekriterium für die bauliche Feuerwiderstandsfähigkeit übernommen, wobei die erforderlich Sicherheit im Brandfall darüber hinaus differenziert werden könnte. Nähere Einzelheiten hierzu im Abschlussbericht des Projekts [11] (Kapitel 2.8, Anhang B, Teil der Arbeitsgruppe 5), wo eine von den Rettungsbedingungen abhängige Zielversagenswahrscheinlichkeit p_t [1/Jahr] vorgeschlagen wird:

- $p_t = 1,3 \cdot 10^{-4}$ für normale Rettungsbedingungen p_t [1/Jahr]
- $p_t = 1,3 \cdot 10^{-5}$ für schwierige Rettungsbedingungen (Krankenhaus, usw.)
- $p_t = 1,3 \cdot 10^{-6}$ für Unmöglichkeit einer Rettung (z.B. Hochhaus).

Dies könnte zu interessanten Neuerungen führen. Es werden jedoch weiterhin die allgemein akzeptierten Werte aus dem EN 1990 [10] verwendet, da die niedrigeren Werte erst durch die Behörden genehmigt werden müssen.

5.4.3 *Baulicher Brandschutz und bedingte Versagenswahrscheinlichkeit*

EN 1990, Anhang C [10], der die zu den Bemessungswerten für Beanspruchungen und Materialeigenschaften führende semiprobabilistische Methode näher beschreibt, wurde um die Feuerwiderstandsfähigkeit erweitert.

Die Sicherheitsfaktoren für Beanspruchungen $g_{s,i}$ und Materialeigenschaften $g_{r,i}$ wurden bei angenommener Raumtemperatur auf semiprobabilistischem Weg abgeleitet. Diese Methode impliziert, dass die Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerks p_f niedriger ist als die Zielversagenswahrscheinlichkeit p_t von $7,23 \cdot 10^{-5}$ je Nutzungsdauer des Gebäudes, was einem Sicherheitsfaktor b von 3,8 entspricht:

$$p_f \text{ (Versagenswahrscheinlichkeit)} \leq p_t \text{ (Zielwahrscheinlichkeit)} \quad (5.5)$$

Im Brandfall ist das Feuer die Primärbeanspruchung, das über die Brandlast in kg Holz oder in MJ quantifiziert werden kann. Diese Brandlast beansprucht das Gebäude jedoch erst dann, wenn es tatsächlich zu einem Brand gekommen ist. Die Brandlast wirkt nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit p_{fi} , auf das Gebäude ein; p_{fi} ist hierbei das Produkt aus p_{start} (Wahrscheinlichkeit, dass ein Feuer ausbricht) und p_{spread} (Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem Flash-over kommt oder der gesamte Brandraum vom Feuer erfasst wird).

Im Falle eines Feuers, das als Zufallsereignis betrachtet wird, wird Gleichung (5.5) zu:

$$\begin{aligned} p_{f,fi} \text{ (Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall)} \cdot p_{fi} \text{ (Wahrscheinlichkeit eines Brandes)} \\ \leq p_t \text{ (Zielwahrscheinlichkeit)} \end{aligned}$$

Damit ergibt sich:

$$\begin{aligned} p_{f,fi} &\leq (p_t/p_{fi}) \\ p_{f,fi} \leq p_{t,fi} &\Rightarrow \mathbf{b}_{fi} = \mathbf{b}_{fi,t} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Während der Zielwert p_t von $7,23 \cdot 10^{-5}$ zu dem konstanten Sicherheitsindex b_t bei Raumtemperatur führt, erhält man im Brandfall keinen festen Wert für den in diesem Fall als $b_{fi,t}$ bezeichneten Sicherheitsindex, da der Zielwert $p_{t,fi}$ durch Gleichung (5.6) von der Wahrscheinlichkeit eines Brandes p_{fi} abhängt. Ist $b_{fi,t}$ bekannt, lässt sich der Bemessungswert für die Brandbelastung wie nachstehend beschrieben ableiten.

5.4.4 *Rechnerische Brandbelastung und globaler d-Faktor*

Zuverlässigkeitsberechnungen (siehe Kapitel 7.4 in [11]) haben gezeigt, dass der Wichtungsfaktor für die Primärbeanspruchung bei Raumtemperatur im Brandfall stark abnimmt und deshalb als Sekundärbeanspruchung betrachtet werden kann, während die Brandlast zur Primärbeanspruchung wird.

Außerdem haben diese Berechnungen ergeben, dass die für den Wichtungsfaktor getroffenen Annahmen mit (-0,7) für die Primärbeanspruchung zu ändern und für a_{qf} ein Wert von (-0,9) zu wählen ist.

Für die in dem britischen Bericht „The Application of Fire Safety Engineering Principles to the Safety in Buildings“ [14] angegebenen Brandbelastungen und die von Prof. Fontana durchgeführten Untersuchungen [15] wird eine gute Übereinstimmung der Brandlastdaten mit der Gumbel-I-Verteilung festgestellt. Es wurde ein Variationskoeffizient V_{qf} von 0,3 gewählt [11].

Gemäß [10] ergibt sich der Bemessungswert (siehe Wechsellasten) für die Gumbel-Verteilung aus:

$$q_{f,d} = m_{qf} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{p} V_{qf} \left[0,577 + \ln \left(-\ln f(0,9 \mathbf{b}_{fi,t}) \right) \right] \right\} \quad (5.7)$$

wobei m_{qf} den Mittelwert für die Brandlast und f die Verteilungsfunktion der Normalverteilung angibt.

Wie in [28] empfohlen, wurde ein Sicherheitsfaktor $g_{f,D} = 1,05$ für das Modell zur Berechnung der Beanspruchung berücksichtigt.

Durch einen Kennwert $q_{f,k}$ als 80% Fraktile (siehe EN 1991-1-2, Anhang E [2] und [24]) ergibt sich für den Faktor g_{ff}

$$g_{ff} = \frac{q_{f,d}}{q_{f,k}} = 1,05 \frac{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{p} V_{qf} \left[0,577 + \ln \left(-\ln f(0,9 \mathbf{b}_{fi,t}) \right) \right] \right\}}{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{p} V_{qf} \left[0,577 + \ln \left(-\ln 0,8 \right) \right] \right\}} \quad (5.8)$$

$$= 2,38 \text{ für } \mathbf{b} = 3,8 \text{ und } 0,82 \text{ für } \mathbf{b} = 0$$

Die Entwicklung von g_{ff} in Abhängigkeit von $\mathbf{b}_{fi,t}$ folgt aus Abb. 5.3.

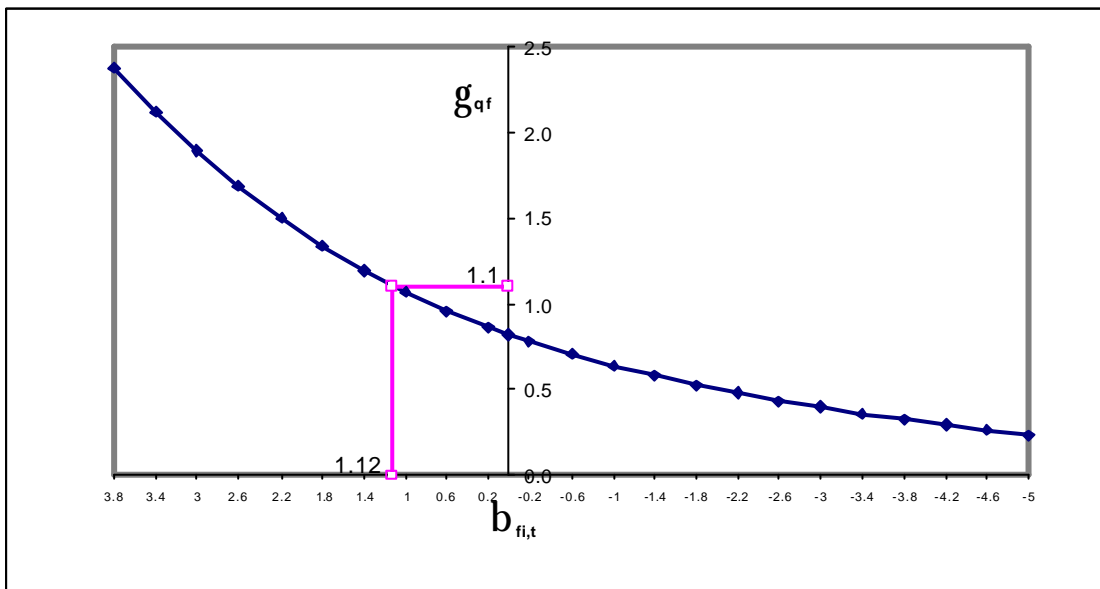


Abb. 5.3 : Sicherheitsfaktor g_{ff} in Abhängigkeit von \mathbf{b}_{fi}

Der Sicherheitsindex $\mathbf{b}_{fi,t}$ lässt sich mit Hilfe folgender Formel aus der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines allgemeinen Brandes p_{fi} berechnen:

$$\mathbf{b}_{fi,t} = \mathbf{f}^{-1} \left(\frac{p_t}{p_{fi}} \right) = \mathbf{f}^{-1} \left(\frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{p_{fi}} \right)$$

\mathbf{f}^{-1} ist die Inverse der kumulativen Normalverteilung

Mit Hilfe von Abb. 5.3 lässt sich dann der Faktor g_{ff} für die Brandbelastung ableiten.

Dieses komplexe Verfahren beinhaltet:

- Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines größeren Brandereignisses p_{fi} ,
- Berechnung von (p_t/p_{fi}) ,

- Ableitung des Zielwahrscheinlichkeitsindex $b_{fi,t}$
- Erhalt des Faktors g_{jf}

Dieses Verfahren wurde durch Aufgliederung des Faktors g_{jf} in 3 Koeffizienten g_{q1} , g_{q2} und g_{ni} differenziert, um den Einfluss der Brandabschnittsgröße, des Risikos einer Brandentstehung bzw. der aktiven Brandbekämpfungsmaßnahmen auf p_{fi} zu berücksichtigen (siehe Tabelle 5.6).

Tab. 5.6 d -Faktoren [1]

Grundfläche des Brandabschnitts A_r [m ²]	Brandentstehungsgefahr d_{q1}	Brandentstehungsgefahr d_{q2}	Beispiele für verschiedene Nutzungen
25	1,10	0,78	Kunstgalerie, Museum, Schwimmbad
250	1,50	1,00	Büro, Hotel, Wohngebäude
2500	1,90	1,22	Fertigung von Maschinen & Motoren
5000	2,00	1,44	Chemische Labore, Malerwerkstätten
10000	2,13	1,66	Herstellung von Feuerwerken oder Farben

d_{ni} Abhängigkeit für die Brandbekämpfung									
Automatische Brandbekämpfung		Automatische Branderkennung			Manuelle Brandbekämpfung				
Automatisches Wasser Löschsystem	Unabhängige Wasser Versorgung	Automatische Branderkennung & Alarm	Automatische Alarmübermittlung zur Feuerwehr	Werks-Feuerwehr	externe Feuerwehr	sichere Zugangswege	Geräte zur Brandbekämpfung	Rauchabzug	
d_{n1}	0 1 2 d_{n2}	by Heat d_{n3}	by Smoke d_{n4}	d_{n5}	d_{n6}	d_{n7}	d_{n8}	d_{n9}	d_{n10}
0,61	1,0 0,87 0,7	0,87 or 0,73		0,87	0,61 or 0,78	0,9 or 1 1,5	1,0 1,5	1,0 1,5	1,0 1,5

* Für "normale" Brandbekämpfungsmaßnahmen, die ständig da sein sollten, wie sichere Zugangswege, die Geräte zur Brandbekämpfung und Rauchabzüge in Treppenhäusern, sollten die δ_{ni} mit 1,5 angenommen wenn diese Maßnahmen nicht vorhanden sind.

Nachdem der Faktor g_{jf} mit Hilfe einer der beiden genannten Methoden berechnet wurde, kann die rechnerische Brandbelastung $q_{f,d}$ abgeleitet werden:

$$q_{f,d} = d_{q1} \cdot d_{q2} \cdot d_{ni} \cdot q_{f,k}$$

Diese rechnerische Brandbelastung wird dann in den in Kapitel 6 und 7 beschriebenen Werkzeugen in Ansatz gebracht.

6 BERECHNUNG DER BRANDENTWICKLUNG

Für eine numerische Simulation der Brandentwicklung können unterschiedliche vereinfachende Annahmen getroffen werden. In diesem Kapitel werden Modelle für die Brandentstehungsphase (Modelle für einen örtlich begrenzten Brand und 2-Zonen-Modelle) und für die stationäre Phase nach dem Flash-over vorgestellt. Die Feldmodelle (CFD: Computer Fluid Dynamics) bleiben in diesem Kapitel unberücksichtigt, da sie zu aufwendig sind und somit als einfache Werkzeuge nicht zur Verfügung stehen.

6.1 Örtlich begrenzter Brand

Bei einem örtlich begrenzten Brand sammeln sich die Verbrennungsprodukte in einer Schicht unter der Decke (obere Schicht), wobei sich eine horizontale Rauchgasgrenze zwischen dieser Heißgasschicht und der unteren Schicht herausbildet, in der weitaus geringere Gastemperaturen gemessen werden.

Diese Bedingungen lassen sich sehr gut mit einem Zweizonenmodell abbilden, das auf alle Brandbedingungen vor einer Durchzündung anwendbar ist. Außer zur Berechnung der Heißgas-temperaturentwicklung werden diese Modelle zur Bestimmung der Rauchgasausbreitung in Ge-

bäuden herangezogen sowie zur Abschätzung des Personenschutzes in Abhängigkeit von der Stärke der Rauchgasschicht, der Konzentration toxischer Gase, der Wärmeübertragung und der optischen Dichte.

Die thermische Beanspruchung horizontaler Bauteile über dem Brandherd ist nicht zuletzt von ihrem Abstand zum Brandherd abhängig. Diese Beanspruchung kann mit Hilfe spezieller Modelle, wie beispielsweise der Hasemi-Methode [17], zur Beurteilung des lokalen Einflusses auf angrenzende Bauteile ermittelt werden.

6.1.1 Zwei-Zonenmodelle

Als Zonenmodelle werden die numerischen Programme bezeichnet, die die Entwicklung der Heißgastemperatur zeitabhängig berechnen, wobei herkömmliche Differenzialgleichungen zum Ausdruck des Prinzips der Massen- und Energieerhaltung für jede Zone des Brandabschnitts einbezogen werden. Sie beruhen auf der Grundannahme, dass jede Zone durch einheitliche Temperaturbedingungen bestimmt ist.

Zonenmodelle liefern nicht nur Daten zur Entwicklung der Heißgastemperatur in einem Brandraum, sondern auch zu der in den Wänden vorliegenden Temperatur oder der Geschwindigkeit, mit der die Gase durch die Öffnungen strömen.

Für Zonenmodelle sind folgende Daten erforderlich:

- geometrische Daten, wie Abmessungen des Brandraums, der Öffnungen und der Raumabschlüsse
- Materialeigenschaften der Wände
- Branddaten, wie der Energiefreisetzungsverlauf, die Abbrandrate, die Verbrennungswärme des Brandguts.

In einem Zweizonenmodell werden gesondert für jede der beiden Schichten und unter Berücksichtigung eines zwischen diesen Schichten stattfindenden Austauschs Gleichungen zum Ausdruck des Massen- und Energiegleichgewichts aufgestellt.

Als Ergebnis der Simulation erhält man die Gastemperatur für jede der beiden Schichten sowie Angaben zu den Wandtemperaturen und dem durch die Öffnungen stattfindenden Massenstrom. Ein wichtiges Ergebnis ist die zeitabhängige Entwicklung der Höhe der beiden Schichten. Insbesondere die Höhe der unteren Schicht, die relativ kalt bleibt und keine Verbrennungsprodukte enthält, ist wichtig für eine Abschätzung der Gefährdung für in dem betroffenen Brandraum anwesende Personen. Abbildung 6.1 veranschaulicht die Modellierung eines Brandabschnitts mit Hilfe eines Zweizonenmodells, in dem zwischen Energie- und Massenbilanz unterschieden wird.

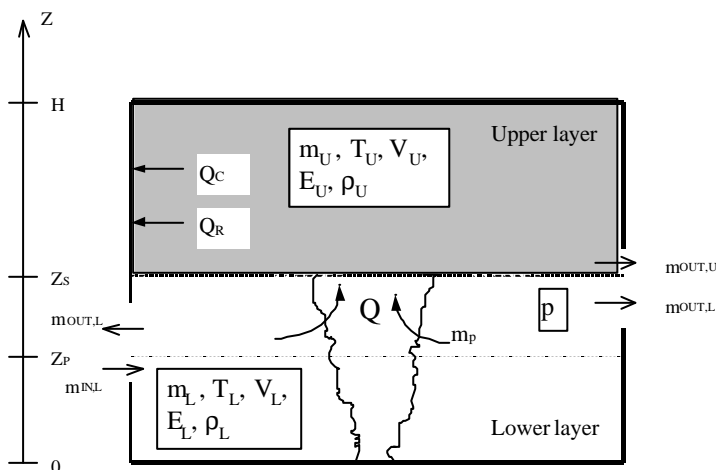


Abb. 6.1: Brandabschnitt im Zweizonenmodell

Abbildung 6.1 zeigt eine einfache Situation, in der ein Energie- und Massenaustausch lediglich nach außen stattfindet. Trotz dieser Vereinfachung können mit diesem Modell auch komplexe Situationen untersucht werden, in denen es zusätzlich zu einem Energie- und Massenaustausch mit anderen Bereichen des Gebäudes kommt. Dies ist insofern von Interesse, als so eine Rauch-

ausbreitung auf angrenzende Brandabschnitte untersucht werden kann. Hierfür stehen Zweizonenmodelle für mehrere Brandabschnitte zur Verfügung (siehe Abbildung 6.2).

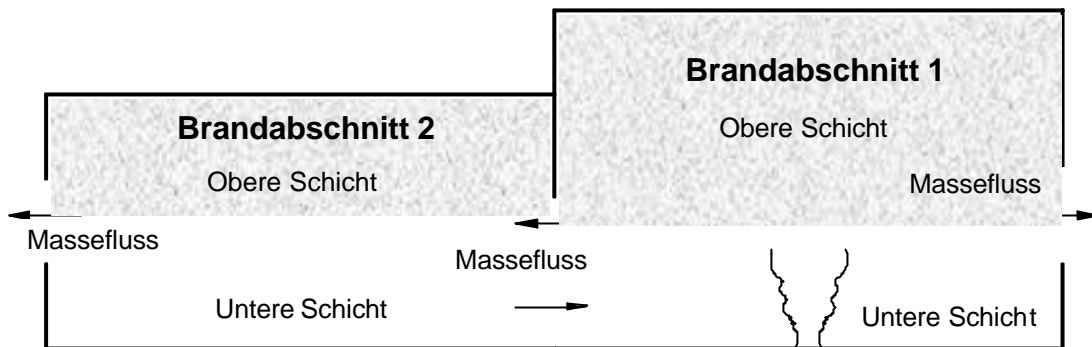


Abb. 6.2: Brandabschnitt in einem komplexen Zweizonenmodell

6.1.2 Das Heskestad-Modell

Die thermischen Einwirkungen können mit dem Heskestad-Modell [1] bestimmt werden. Bei diesem Modell muss unterschieden werden, ob die Flammen die Decke erreichen oder nicht.

Die Flammenlänge L_f eines lokalen Brandes wird wie folgt berechnet (siehe Abbildung 6.3):

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

Wenn die Flamme die Decke nicht erreicht ($L_f < H$; siehe Abbildung 6.3) oder bei einem Brand im Freien, wird die Temperatur $\vartheta_{(z)}$ in dem Plume entlang der vertikalen Flammenachse bestimmt durch:

$$\vartheta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/5} \cdot (z - z_0)^{-5/3}$$

mit:

- D Durchmesser des Feuers [m], siehe Abbildung 6.3
- Q Energiefreisetzungsrate des [W] des Brandes
- Q_c Konvektiver Anteil der Energiefreisetzungsrate [W], mit $Q_c = 0,8 Q$ als Vorgabe
- z Höhe [m] entlang der Flammenachse, siehe Abbildung 6.3
- H Abstand [m] zwischen dem Brandherd und der Decke, siehe Abbildung 6.3

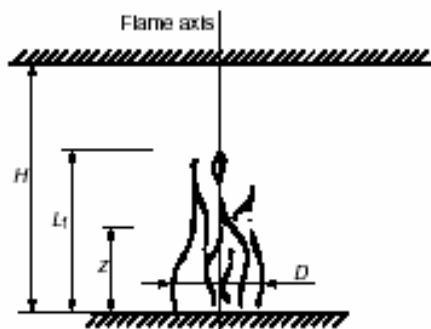


Abb. 6.3 Lokales Brandmodell für Flammen, die die Decke nicht erreichen.

6.1.3 Hasemi-Methode [1, 17]

Die Hasemi-Methode [1, 17] liefert ein einfaches Werkzeug für die Berechnung der lokalen Beanspruchung horizontaler Elemente über dem Brandherd. Sie basiert auf den Ergebnissen der am Building Research Institute in Tsukuba, Japan [-] durchgeführten Versuche.

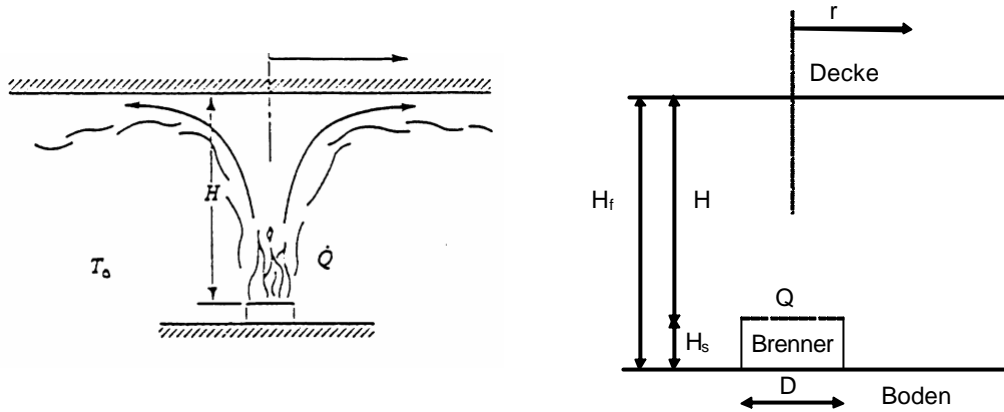


Abb. 6.3: Schematische Darstellung eines begrenzten Brandes und Beschreibung des Feuers nach Hasemi

Die Methode nutzt folgende Daten:

- Q Durch das Feuer freigesetzte Energie [W]
- H_f Höhe zwischen Boden und Decke [m]
- D Durchmesser (oder charakteristische Länge) des Brandherds [m]
- H_s vertikaler Abstand zwischen Boden und Brandherd [m]

Folgende Variable kommen zur Anwendung:

- H Abstand zwischen Brandherd und Decke [m]
- Q^* dimensionslose Energiefreisetzungsrate [-]
- Q_H^* dimensionslose Energiefreisetzungsrate [-]
- z' vertikale Lage der eigentlichen Wärmequelle, bezogen auf den Brandherd [m]
- L_H horizontale Länge der Flamme an der Decke [m]
- r horizontaler Abstand (an der Decke) von der Mitte des Feuers [m]

Die Schritte sind wie folgt:

Berechne H
$$H = H_f - H_s \quad (6.1)$$

Berechne Q^*
$$Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D^{2,5}} \quad (6.2)$$

Berechne Q_H^*
$$Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 H^{2,5}} \quad (6.3)$$

Berechne z'
$$z' = 2,4 D (Q^{*2/5} - Q^{*2/3}) \quad Q^* < 1,00 \quad (6.4)$$

$$z' = 2,4 D (1,00 - Q^{*2/5}) \quad Q^* \geq 1,00 \quad (6.5)$$

Berechne $(L_H + H)/H$
$$\frac{L_H + H}{H} = 2,90 Q_H^{*0,33} \quad (6.6)$$

Berechne L_H aus dem in der vorstehenden Gleichung berechneten Wert sowie aus dem Wert für H .

Berechne den Wert des Wärmestroms q'' in $[\text{kW}/\text{m}^2]$ in einem Abstand r , entsprechend:

$$q'' = 100 \quad y < 0,30 \quad (6.7)$$

$$q'' = 136,30 - 121,00 y \quad 0,30 < y < 1,0 \quad (6.8)$$

$$q'' = 15 y^{-3,7} \quad y > 1,0 \quad (6.9)$$

mit:
$$y = \frac{r + H + z'}{L_H + H + z'} \quad (6.10)$$

Der auf die Decke einwirkende Wärmestrom q'' nimmt in Abhängigkeit von dem Verhältniswert y ab und nimmt in Abhängigkeit von Q zu. Abb. 6.5 zeigt diese Abhängigkeiten für:

$r = 0 \quad H = 5 \text{ m} \quad D = 3 \text{ m}$

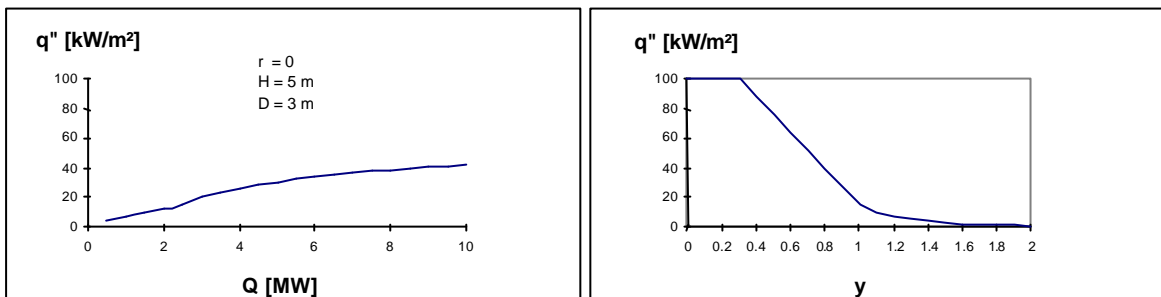


Abb. 6.5 q'' als Funktion von y und Q

6.1.4 Kombination eines Zwei-Zonenmodells mit einem Modell für lokale Brände

Für einen örtlich begrenzten Brand lässt sich die Gastemperaturverteilung innerhalb des Brandraums mit Hilfe eines Zweizonenmodells abschätzen. In diesem Modell wird die Gastemperatur für jede Schicht unter der Annahme berechnet, dass jede dieser Schichten durch eine gleichförmige Temperatur gekennzeichnet ist. Für die Schicht heißer Gase ist die Annahme einer durchschnittlichen Temperatur normalerweise hinreichend genau, sofern allgemeine Faktoren berücksichtigt werden: Menge des aus dem Brandabschnitt abzuziehenden Rauchgases, Wahrscheinlichkeit einer Durchzündung, Versagen der Decke, usw.

Soll das lokale Verhalten eines Bauteils unmittelbar über dem Brandherd abgeschätzt werden, kann sich die Annahme einer gleichförmigen Temperatur als unsicher erweisen, so dass das Zweizonenmodell mit der in Abschnitt 6.1.3 beschriebenen Formel für lokale Brände kombiniert werden muss.

Die Gastemperaturen im Bereich des Trägers erhält man, indem – für jeden Punkt über die Länge des Trägers – die aus beiden Modellen ermittelte maximale Temperatur herangezogen wird.

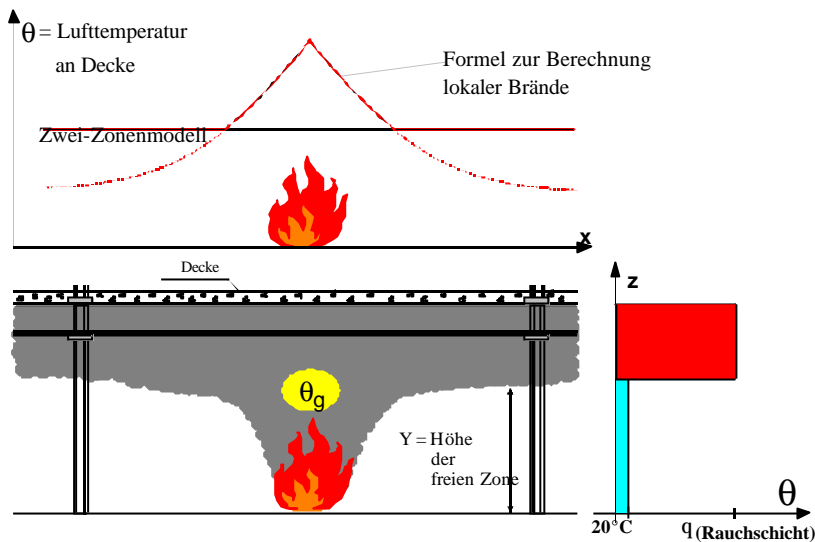


Abb. 6.6 Kombination eines Zwei-Zonen-Modells mit dem Modell eines lokalen Brandes

Die Höhe der Rauchgasschicht und die Heißgastemperatur im Bereich der Stahlkonstruktion in unterschiedlichen Abständen vom Brandherd kann mit Hilfe des TEFINAF-Modells [8] berechnet werden. Dieses Modell ist eine Kombination aus einem Zweizonenmodell, das die Höhe und die Durchschnittstemperatur der Heißgasschicht liefert, und der Formel für lokale Brände, aus der man die Höchsttemperatur unmittelbar über dem Brandherd und in unterschiedlicher Entfernung vom Brandherd erhält.

6.2 VOLLBRAND

Für die Modellierung eines voll entwickelten Brandes in einem Gebäude stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. In diesem Kapitel werden die gebräuchlichsten Modelle beschrieben.

Das Naturbrandkonzept stellt eine Alternative zu den bereits in unterschiedlichen Regelwerken (ISO, ASTM, Hydrokarbonkurven) definierten Normbränden dar, weshalb Normbrände an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt werden.

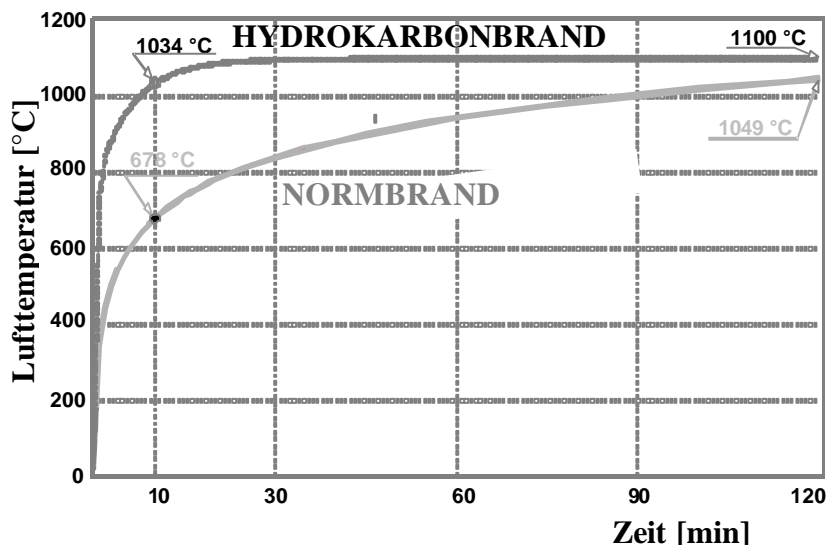


Abb. 6.7 Norm- und Hydrokarbonbrandkurve

Auf die Feldmodelle (CFD) wird hier nicht näher eingegangen, da sie für einfache Werkzeuge zu komplex und aufwendig sind.

6.2.1 Parametrische Brände

Mit Hilfe von Parameterbränden können die wichtigsten, das Brandgeschehen in einem bestimmten Gebäude beeinflussenden physikalischen Faktoren auf einfache Weise berücksichtigt werden. Parameterbrände beruhen wie Normbrände auf Temperatur-Zeitbeziehungen. Im Unterschied zu Normbränden beziehen sie jedoch eine Reihe von Parametern ein, mit denen bestimmte Aspekte der Wirklichkeit abgebildet werden sollen. Fast alle in der Fachliteratur behandelten Parameterbrände berücksichtigen in irgendeiner Weise die folgenden Parameter:

- die Geometrie des Brandraums
- die in dem Brandraum gegebene Brandlast,
- Wand- und/oder Dachöffnungen und
- Art und Ausführung der verschiedenen, den Brandraum abschließenden Elemente.

Parameterbrände basieren auf der Annahme gleicher Temperaturbedingungen innerhalb eines Brandraums. Obwohl ihre Anwendung damit auf die stationäre Brandphase nach Durchzündung in Brandräumen mittlerer Größe begrenzt bleibt, stellen sie dennoch einen entscheidenden Fortschritt dar, da sie die Charakteristik eines bestimmten Brandes besser wiedergeben als Normbrände und gleichzeitig den Vorteil einfacher mathematischer Ansätze bieten, so dass keine aufwendigen Softwarewerkzeuge erforderlich sind. Im Anhang A des Eurocode 1-1-2 [1] wird ein entsprechender Parameterbrand vorgeschlagen. Er gilt für Brandräume ohne Dachöffnungen mit einer Grundfläche von bis zu 500 m² und einer maximalen Höhe von 4 m. b muss zwischen 1.000 und 2.200 liegen und O zwischen 0,02 und 0,20. (O und b werden im Folgenden definiert).

Dieser Vorschlag ist hinsichtlich folgender Punkte verbessert worden:

- genauere Berechnung der thermischen Effusivität (b -Faktor) in Mehrstoffwänden;
- Einführung einer Mindestbranddauer, wobei von einem brandlastgesteuerten Brand sowie geringer Brandlast und großen Öffnungen ausgegangen wird;
- Berichtigungsfaktor zur Berücksichtigung der bei brandlastgesteuerten Bränden durch die Öffnungen stattfindenden großen Massenströme.

Dieses neue Modell für Parameterbrände wird hier vorgeschlagen; es ist für jeden Wert von b gültig.

Die Entwicklung der Gastemperatur in einem Brandraum wird wiedergegeben durch:

$$\mathbf{q}_g = 1.325 \left(1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-1,7t^*} - 0,472 e^{-19t^*} \right) + 20 \text{ °C} \quad (6.11)$$

mit

$$t^* = \Gamma \cdot t \quad (6.12)$$

$$\Gamma = \frac{(O/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad (6.13)$$

$$O = A_v \cdot \sqrt{h} / A_r \quad (6.14)$$

und

t Zeit (in Stunden),

A_v Fläche vertikaler Öffnungen (in m²),

h Höhe vertikaler Öffnungen (in m),

A_r Gesamtfläche der raumabschließenden Elemente (Wände, Decke und Boden, einschließlich Öffnungen) (in m²),

b ist der so genannte b -Faktor in [J/m²s^{1/2}K]; er ist abhängig von der thermischen Trägheit raumabschließender Elemente (siehe Abschnitt 3.3 zur Berechnung von b).

Die Dauer der Erwärmungsphase wird bestimmt durch:

$$t_{\max} = \max\left(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O; t_{\lim}\right) \quad [\text{h}] \quad (6.15)$$

mit:

$q_{t,d}$ Bemessungswert für die auf A_t bezogene Brandbelastung in MJ/m²,

t_{\lim} 20 Minuten, entsprechend der in Eurocode 1-1-2, Anhang A [2] angenommenen Branddauer bei ungehinderter Brandentwicklung.

Für die Anwendung der Gleichung 6.15 bestehen zwei Möglichkeiten:

- entweder die aus dem ersten Ausdruck der Gleichung berechnete Erwärmungsphase, $0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O$, ist größer als die gewählte Zeitbegrenzung t_{\lim} ; in diesem Fall gelten die Gleichungen 6.11 bis 6.14 und 6.21 bis 6.23 ohne jede Berichtigung,
- oder die aus dem ersten Ausdruck der Gleichung berechnete Erwärmungsphase, $0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O$, ist kürzer als die gewählte Zeitbegrenzung t_{\lim} ; es gelten dann die Gleichungen 6.11 bis 6.14 mit einem berichtigten Öffnungsfaktor, O_{\lim} , der als der zu der gewählten Zeitbegrenzung führende Öffnungsfaktor mit Hilfe folgender Gleichung berechnet wurde:

$$O_{\lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/t_{\lim} \quad (6.16)$$

Gleichung 6.15 und 6.16 werden wie folgt verändert:

$$t_{\lim}^* = \Gamma_{\lim} \cdot t \quad (6.17)$$

$$\Gamma_{\lim} = \frac{(O_{\lim}/0,04)^2}{(b/1,160)^2} \quad (6.18)$$

und in Gleichung 6.11 wird t_{\lim}^* anstelle von t^* eingesetzt.

Schließlich der Einfluss der Lüftung während der Erwärmungsphase für $t_d = t_{\lim}$:

Wenn $O > 0,04$ und $q_{t,d} < 75$ und $b < 1,160$

$$\text{dann } k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04}\right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75}\right) \left(\frac{1,160 - b}{1,160}\right) \quad (6.19)$$

$$\text{und } \Gamma_{\lim} = k \cdot \frac{(O_{\lim}/0,04)^2}{(b/1,160)^2} \quad (6.20)$$

Die Temperatur-Zeitkurve während der Abkühlphase wird wiedergegeben durch:

$$q_g = q_{\max} - 625 \cdot (t - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{für } t_d^* \leq 0,5 \quad (6.21)$$

$$q_g = q_{\max} - 250 \cdot (3 - t_{\max}^*) \cdot (t - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{für } 0,5 \leq t_d^* \leq 2,0 \quad (6.22)$$

$$q_g = q_{\max} - 250 \cdot (t - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{für } 2,0 \leq t_d^* \quad (6.23)$$

mit q_{\max} als Höchsttemperatur am Ende der Erwärmungsphase, ausgedrückt durch 6.11, wobei $t = t_d$ durch 6.15 ersetzt wird.

$$t_{\max}^* = (0,210^{-3} \cdot q_{t,d}/O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1 \quad \text{für } t_{\max} > t_{\lim}$$

$$x = \frac{t_{\lim} \cdot \Gamma}{t_{\max}^*} \quad \text{für } t_{\max} = t_{\lim}$$

Ergebnisse (Brandbelastung $q_{t,d} = 180 \text{ MJ/m}^2$, $b = 1,160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$, Öffnungsfaktor O aus $0,04 \text{ m}^{1/2}$ bis $0,20 \text{ m}^{1/2}$) sind beispielhaft in Abbildung 6.7 dargestellt.

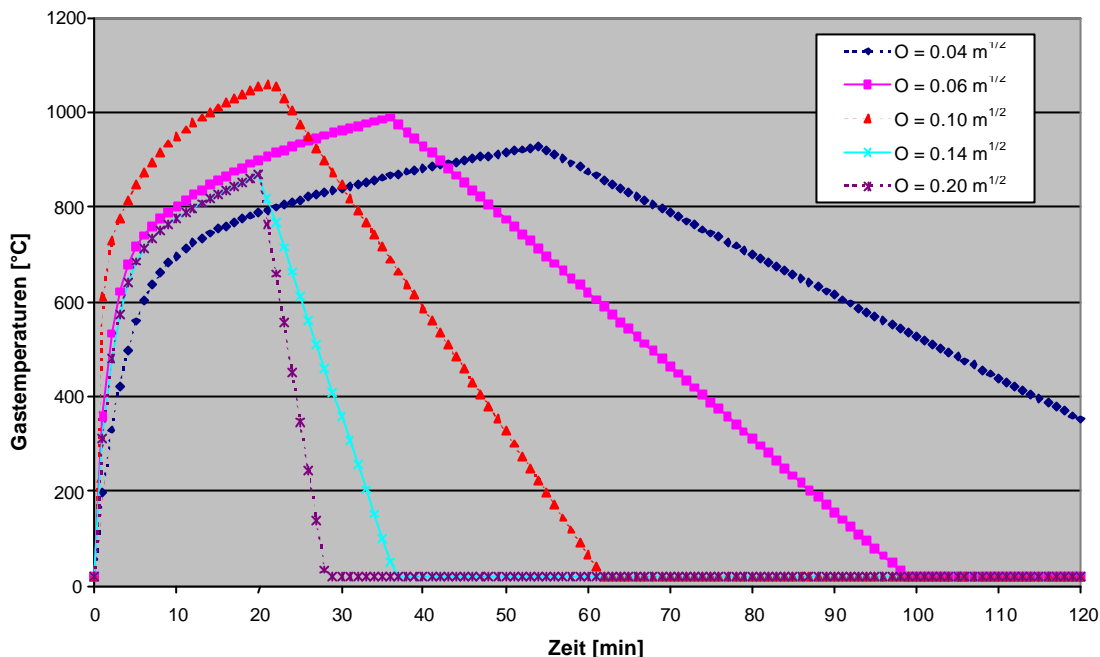


Abb. 6.8: Beispiel für Parameterbrände

Mit dem Parameterbrand wurde ein Vergleich zwischen Versuchsergebnissen [12] und den Ergebnissen der verbesserten Voraussagen angestellt. Abbildung 6.9 zeigt die maximale Gastemperatur. Für den Korrelationskoeffizienten, der nach der früheren Eurocode-Formel einen Wert von 0,19 hatte, gilt jetzt ein Wert von 0,83.

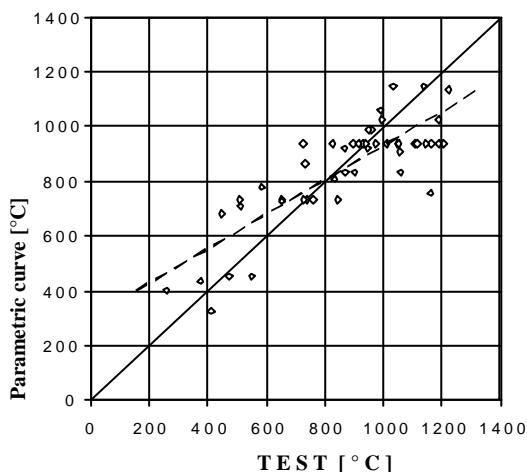


Abb. 6.9: Maximale Gastemperatur im Brandabschnitt

6.2.2 Zonenmodelle

Zonenmodelle wurden bereits in Kapitel 6.1.1 mit einer kurzen Erläuterung zu einem Zweizonenmodell eingeführt. Zweizonenmodelle dienen der Beschreibung der Brandentstehungsphase, während für einen voll entwickelten Brand das Einzonnenmodell zur Anwendung kommt.

6.2.3 Ein-Zonenmodell

Das Einzonenmodell geht von der Grundannahme aus, dass im Brandfall in einem Brandabschnitt einheitliche Rauchgastemperaturen herrschen, so dass mit diesem Modell die stationäre Brandphase nach Durchzündung beschrieben wird.

Es sind detailliertere Daten im Vergleich zu den Parameterkurven erforderlich. Die Daten entsprechen denen der Zwei-Zonenmodelle.

Abbildung 6.9 zeigt die Modellierung eines Brandes innerhalb eines Brandabschnitts mit besonderer Angabe der Energie- und Massenbilanzen.

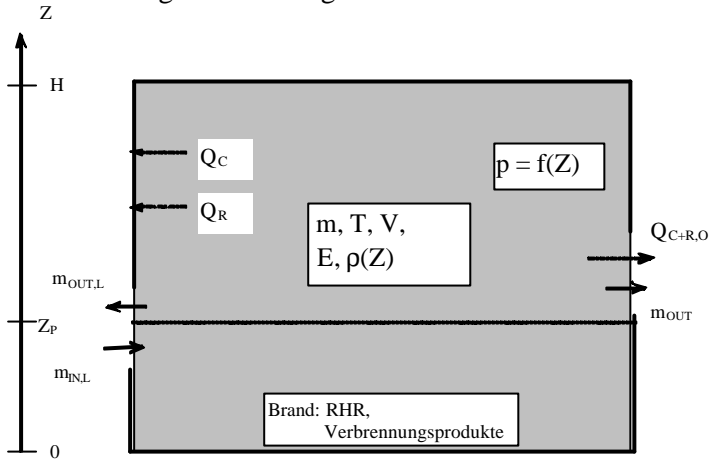


Abb. 6.10: Brandabschnitt in einem Einzonenmodell

Im Zuge der ECSC-Projekte NFSC 1 & 2 [11, 12] wurde das Zwei-Zonenmodell Ozone zusammen mit PROFILARBED an der Universität Lüttich entwickelt und mit den Ergebnissen von 54 Versuchen validiert. Abbildung 6.11 stellt die im Versuch gemessenen maximalen Gas-temperaturen den mit Hilfe des Modells berechneten gegenüber. Jeder Punkt steht für einen Versuch. Die Diagonale ist die idealisierte Lage der einzelnen Punkte, die gestrichelte Linie stellt die lineare Regression für alle Punkte dar.

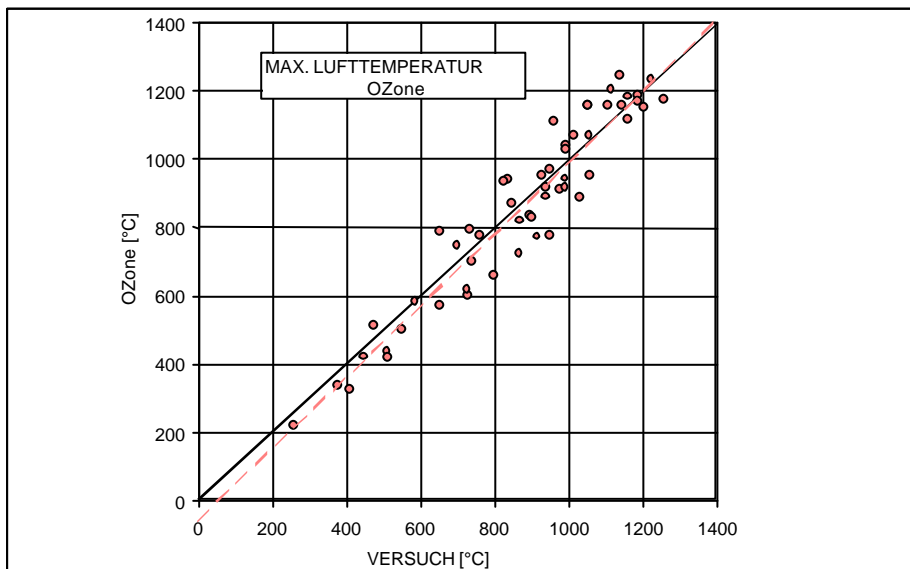


Abb. 6.11: Max. Gastemperatur im Brandabschnitt

Abb. 6.12 zeigt einen weiteren Vergleich. Für jeden Versuch wurde die Temperaturentwicklung für ein typisches unbedecktes Stahlprofil – HEB 200, $A_m/V = 147 \text{ m}^{-1}$ – berechnet und dann zunächst der gemessenen und danach der berechneten Gastemperatur gegenübergestellt. Dies

ergab eine Kurve, in der jeder Versuch durch die max. Temperatur in dem unbekleideten Stahlprofil dargestellt ist.

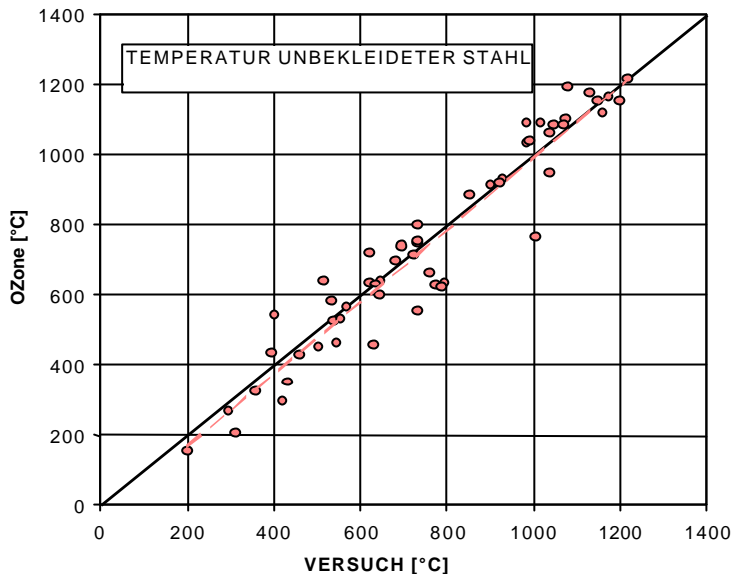


Abb. 6.12: Max. Temperatur im unbekleideten Stahlprofil

6.3 Kombination von Ein- und Zwei-Zonenmodellen und Wahl des Modells

Wenn die charakteristischen Branddaten festgelegt sind (Energiefreisetzungsrate, Geometrie des Brandraums, Wandeigenschaften), ist ein Brandmodell auszuwählen, das dem betrachteten Brandszenario entspricht. Entscheidend für diese Auswahl ist der Anwendungsbereich des jeweiligen Modells.

Bei den hier vorgenommenen Überlegungen wird davon ausgegangen, dass in erster Linie das Zweizonenmodell zur Anwendung kommt, so dass die eigentliche Frage in dem Übergang zum Einzonenmodell besteht.

Die Ergebnisse eines Zweizonenmodells werden durch zwei Hauptvariable angegeben:

- Temperatur des oberen Bereichs T_u
- Höhe der Rauchgasgrenze zwischen den beiden Bereichen H_i

Diese beiden Variablen bedingen eine Simulation mit dem Zonenmodell (siehe Abb. 6.14). Die folgenden vier Bedingungen können die Anwendung eines Zweizonenmodells einschränken:

- Bedingung 1 (C1): $T_u > 500^\circ\text{C}$
- die hohe Temperatur der Verbrennungsprodukte (über 500°C) führt zu einer Brandübertragung durch Strahlungswärme auf andere Brandlasten im Brandraum;
- Bedingung 2 (C2): $H_i < H_q$ und $T_u > T_{\text{ignition}}$
- aufgrund der reduzierten Höhe der Rauchgasgrenze (H_i) befindet sich brennbares Material innerhalb der Rauchgasschicht (max. Höhe mit brennbarem Material H_q); sollten in der Rauchgasschicht hohe Temperaturen herrschen (über Entzündungstemperatur T_{ignition} , wofür Temperaturen von 300°C angenommen werden), wird der gesamte Brandabschnitt durch ein Übergreifen des Feuers auf das brennbare Material vom Brandgeschehen erfasst;
- Bedingung 3 (C3): $H_i < 0,1 H$
- die Höhe der Rauchgasgrenze nimmt weiter ab und lässt einen sehr kleinen unteren Bereich, der für die Bedingung der zwei Zonen nicht mehr repräsentativ ist;
- Bedingung 4 (C4): $A_{fi} > 0,5 A_f$
- das Feuer hat im Verhältnis zur Grundfläche des Brandabschnitts zu große Bereiche erfasst, so dass nicht länger von einem örtlich begrenzten Brand ausgegangen werden kann.

Aufgrund der Bedingungen 1 oder 2 muss die ursprüngliche Energiefreisetzungsrate (Simulation mit dem Zweizonenmodell) entsprechend einer Einzonensimulation modifiziert werden. Diese Modifizierung ist in Abb. 6.12 dargestellt.

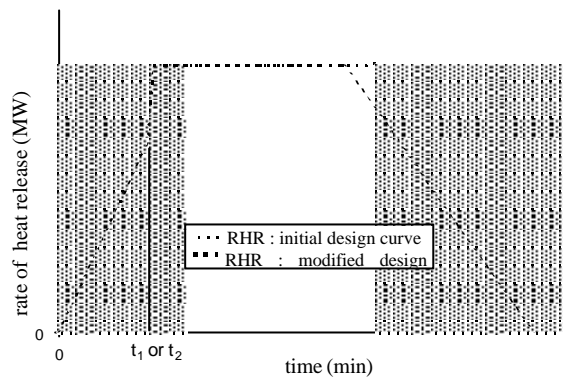


Abb. 6.13: Bemessungskurven für die Energiefreisetzungsrate

In Abbildung 6.14 ist schematisch dargestellt, unter welchen Bedingungen (Zwei- oder Einzonenmodell) die Bemessungstemperaturkurven zu bestimmen sind.

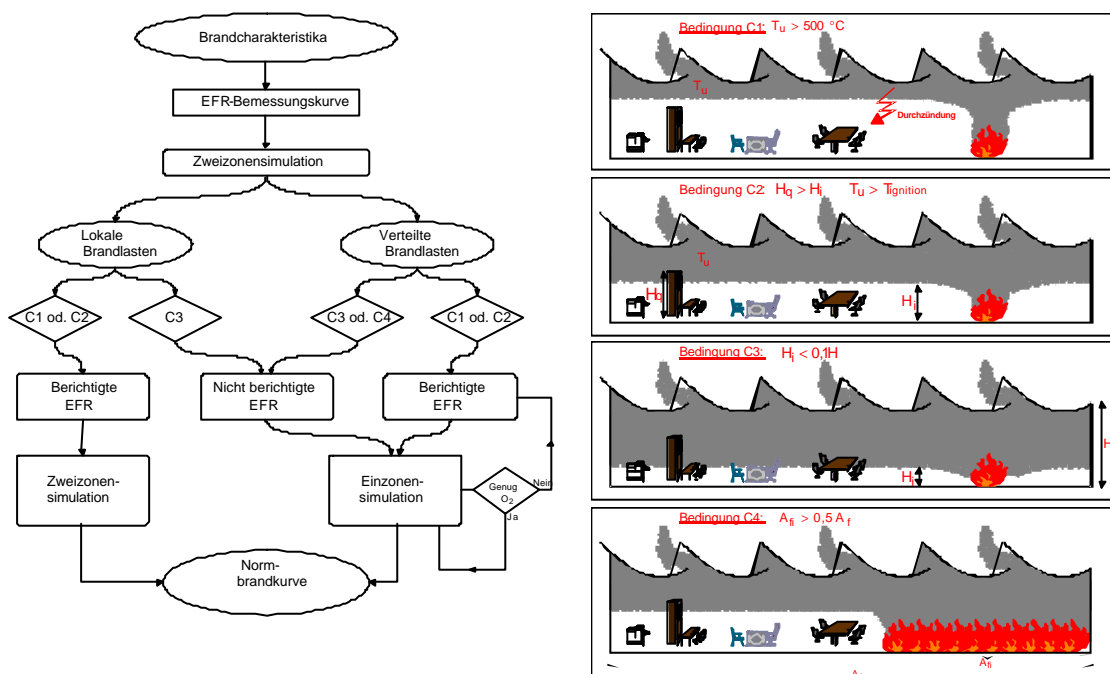


Abb. 6.14 Kombination der Ein- und Zwei-Zonenmodelle

7 MECHANISCHE EINWIRKUNGEN NACH EUROCODE

Im Brandfall wird die Belastung des Tragwerks nach der folgenden Formel ermittelt (siehe Gleichung 6.11 des EN 1990):

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,j} + (y_{1,1} \text{ or } y_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} y_{2,i} Q_{k,i}$$

mit:

- $G_{k,j}$ Charakteristische Werte für ständige Lasten
- $Q_{k,1}$ Charakteristische führende veränderliche Last
- $Q_{k,i}$ Charakteristische begleitende veränderliche Lasten
- $y_{1,1}$ Kombinationsfaktor für den häufigen Wert einer veränderlichen Last
- $y_{2,i}$ Kombinationsfaktor für den quasi ständigen Wert einer veränderlichen Last

Werte für die Kombinationsfaktoren y_1 and y_2 sind in EN 1990 Tabelle A1.1 gegeben, können aber durch nationale Anwendungsdokumente modifiziert werden.

Tab. 7.1 Werte des y -Faktors für Gebäude (siehe EN 1990 Tabelle A1.1)

Action	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Imposed loads in buildings, category (see EN 1991-1.1)			
Category A : domestic, residential areas	0,7	0,5	0,3
Category B : office areas	0,7	0,5	0,3
Category C : congregation areas	0,7	0,7	0,6
Category D : shopping areas	0,7	0,7	0,6
Category E : storage areas	1,0	0,9	0,8
Category F : traffic area vehicle weight $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Category G : traffic area, $30\text{ kN} < \text{vehicle weight} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Category H : roofs	0	0	0
Snow loads on buildings (see EN1991-1.3)			
Finland, Iceland, Norway, Sweden	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H > 1000\text{ m}$ a.s.l.	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H \leq 1000\text{ m}$ a.s.l.	0,50	0,20	0
Wind loads on buildings (see EN1991-1.4)	0,6	0,2	0
Temperature (non-fire) in buildings (see EN1991-1.5)	0,6	0,5	0

Der Eurocode bietet eine weitere Möglichkeit zur Lastermittlung. So kann das Lastniveau im Brandfall h_{fi} mit $h_{fi} = E_{d,fi} / E_d$ ermittelt werden. Dabei ist E_d die Einwirkung im Kaltfall und $E_{d,fi}$ die Einwirkung im Heißfall. Alternativ kann das Lastniveau wie folgt berechnet werden:

$$h_{fi} = \frac{G_k + y_{fi,1} \cdot Q_{k,1}}{g_G \cdot G_k + g_{Q,1} \cdot Q_{k,1}}$$

wobei $g_{Q,1}$ der Teilsicherheitsbeiwert der führenden veränderlichen Last ist.

Das Lastniveau h_{fi} hängt stark von dem Kombinationsfaktor $y_{1,1}$ ab. Dieser variiert wiederum in Abhängigkeit der Gebäudenutzungsart. Im EN 1993-1-2 und EN 1994-1-2 ist die Abbildung 7.1 dargestellt, die den Einfluss der Lastausnutzung $Q_{k,1} / G_k$ und des Kombinationsfaktors $y_{1,1}$ auf das Lastniveau zeigt.

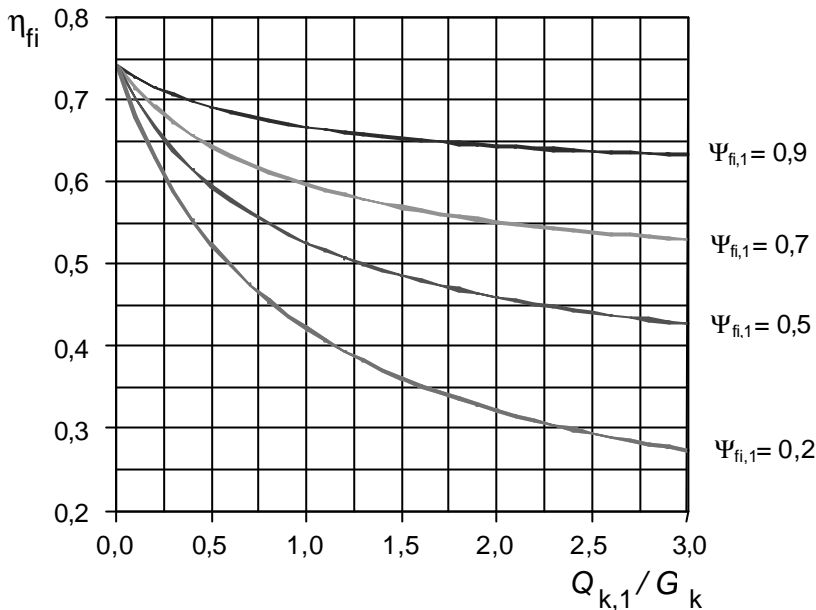


Abb. 7.1 Einfluss des Lastausnutzungsgrades $Q_{k,1}/G_k$ auf das Lastniveau η_{fi}

8 FAZIT

In diesem Teil wurden Modelle zur Berechnung der Raumtemperatur im Brandfall in einem Brandabschnitt vorgestellt. Zur Ermittlung der Bauteiltemperatur ist der Wärmestrom des Bauteils zu bestimmen.

Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung besteht zwischen den heißen Gasen, der Flamme, den Umfassungsbauteilen und dem Bauteil. Emissivitäten und Wärmeübergangskoeffizienten beeinflussen die Wärmeübertragung.

Die Bauteiltemperatur hängt von der Art des Bauteils (z.B. Stahl- oder Verbundbauteil) und der Art und Dicke des Brandschutzmaterials ab. Dies wird im DIFISEK-Teil 2 behandelt.

Wenn das Temperaturfeld und die Lasten im Brandfall eines Tragwerks bekannt sind, kann das thermo-mechanische Verhalten bestimmt werden. Dies wird im DIFISEK-Teil 3 behandelt.

9 REFERENZEN

- [1] CEN; EN 1991-1-2, Eurocode 1- Actions on structures, Part 1.2-Actions on structures exposed to fire. CEN Central Secretariat, Brüssel, November 2002.
- [2] BSI 96/540493 "The use of Fire Safety Engineering in Buildings" (Entwurf 27 März 1996)
- [3] Initial Fires: Lund University, Sweden. Institute of Fire Safety Engineering. ISSN 1102-8246. ISRN LUTVDG/TVBB--3070--SE. April 1993.
- [4] ARGOS Theory Manuel (draft 5)-Danish Institute of fire technology - 22/07/92
- [5] Peacock, Jones, Bukowski and Forney. NIST Handbook 146, Volume II - Technical Reference Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method - Version 1 - Juni 1991
- [6] Babrauskas Vytenis: "Burning Rates" Section 3/Chapter 1: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Zweite Edition - 13. April 1995
- [7] NKB Committee and Works reports 1994:07E: "Performance and Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation"; Nordic Committee on Building Regulations.
- [8] "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Large Compartments"; Abschlussbericht CEC Vereinbarung 7210/ SA210, 317,517,618,832-Februar 1997.
- [9] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Closed Car Parks" ECSC Research 7210-SA/211/318/518/620/933; 1993-1996; Abschlussbericht 1999 - EUR 18867 EN
- [10] CEN; EN1990, Eurocode - Basis of structural design, 2001.

- [11] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Competitive steel buildings through natural fire safety concept." ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98; Abschlussbericht 2002 – EUR 20360 EN.
- [12] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Natural fire safety concept –Full scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool." ECSC Research 7210-060, 1997-2000;, Abschlussbericht 2003 - EUR 20580 EN..
- [13] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Valorisation project - Natural Fire Safety Concept." ECSC Research 7215-PA/PB/PC –042-057, D-E-F-I-NL-UK & ECCS, 1999-2001.
- [14] DD 0000 The Use of Fire Safety Engineering in Buildings. Entwurf zur Bewilligung zur Veröffentlichung; 27. März 96, Technical Committee FSH / 24. 96/540493.
- [15] Fontana M.: "Required Fire Resistance of Building Elements" - Part A: Fire Load in Buildings, Probability Density Function - , NFSC WG4, Zürich, März 1996
- [16] Background document Eurocode 1 (ENV 1991) Part 1: Basis of Design, Working Document N° 94 of ECCS, März 1996.
- [17] Hasemi Y. and Tokunaga Tazo: "Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames". Fire Science and Technology, Vol.4, N°1, 1984.
Ptchelintsev A., Hasemi Y., Nikolaenko M., "Numerical Analysis of Structures exposed to localized Fire", ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
Wakamatsu T., Hasemi Y., Yokobayashi Y., Ptchelintsev A.: "Experimental Study on the Heating Mechanism of a Steel Beam under Ceiling exposed to a localized Fire".
Hasemi Y., Yokobayashi Y. , Wakamatsu T., Ptchelintsev A.: "Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire"- Scope and Experiments on Ceiling/Beam System Exposed to a Localized Fire, ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
- [18] Hietaniemi J: " Risk-Based Fire Resistance Requirements" ECSC Research 7210-PR-251, 2000-2003
- [19] Kumar S., Welch S., "Natural Fire Safety Concept – The development of a CFD-Based Engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures" 7210-PR184, 1999-2002
- [20] iABSE Kolloquium: Basis of Design and Actions on Structures; Background and applications of EC 1; Delft 1996
- [21] Evaluation du Risque d'Incendie", Méthode de Calcul, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, documentation n° 81, 1984.
- [22] Thomas P.H.: "Design Guide Structural Fire Safety", Workshop CIB W14, Februar 1995.
- [23] CEN; ENV1991-2-2, Eurocode 1– Basis of design and actions on structures- Part 2-2: Actions on structures- Actions on structures exposed to fire, 1995.
- [24] Cajot L-G, Haller M., et al: "Probabilistic Quantification of a Steel Structure highlighting the potential of steel versus other materials" ECSC Research 7210-PA/PB/PC/PD-249, 2000-2003