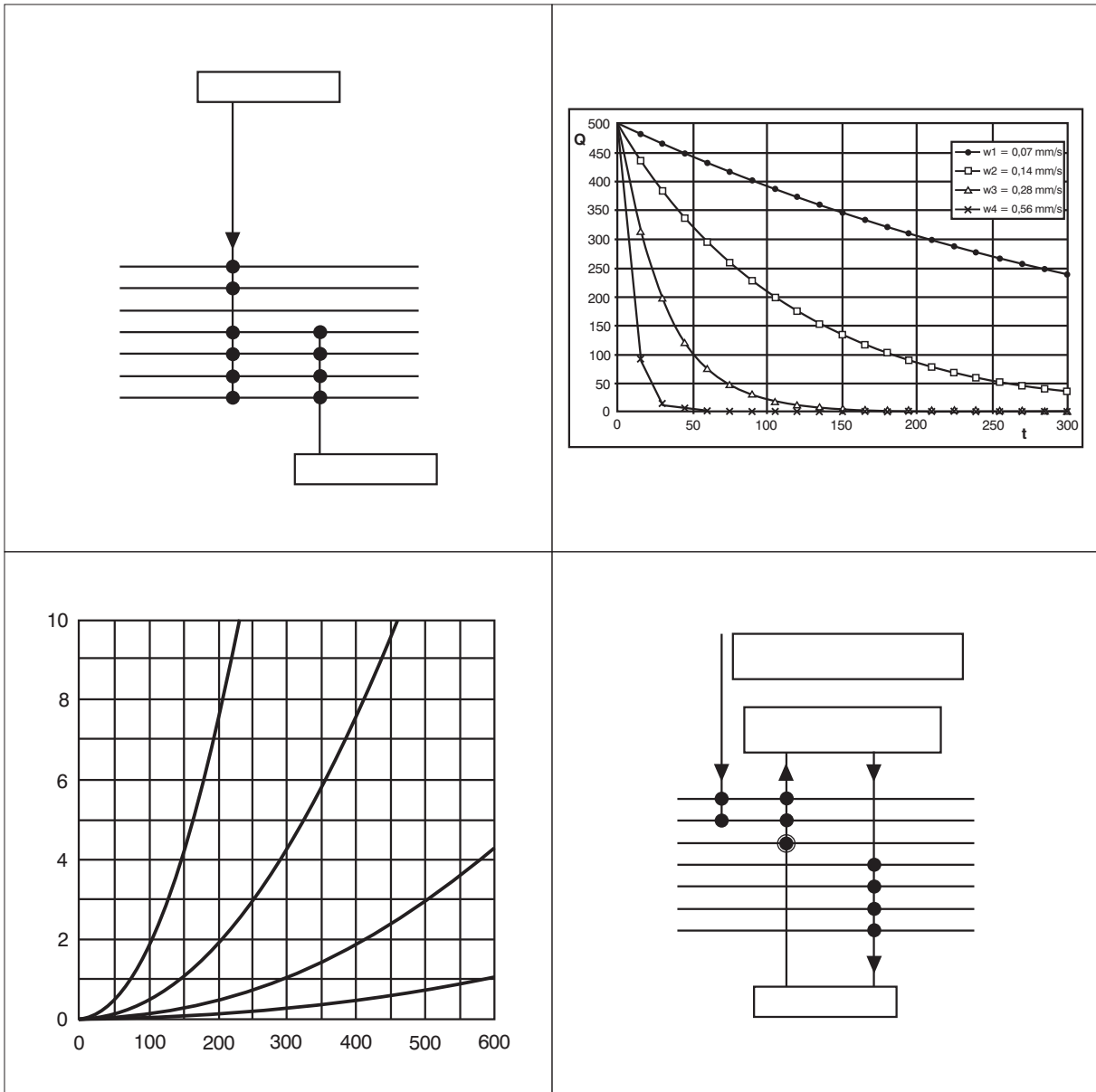


Bemessungsbrände

für Brandsimulationen und Brandschutzkonzepte



Die vorliegende Publikation ist unverbindlich. Die Versicherer können im Einzelfall auch andere Sicherheitsvorkehrungen oder Installateur- oder Wartungsunternehmen zu nach eigenem Ermessen festgelegten Konditionen akzeptieren, die diesen technischen Spezifikationen oder Richtlinien nicht entsprechen.

Bemessungsbrände

für Brandsimulationen und Brandschutzkonzepte

Eine **D-A-CH** Publikation, gemeinschaftlich herausgegeben von

■ **Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV)**

Wilhelmstr. 43/43G
10117 Berlin
Deutschland
Telefon +49 (0)30 2020 5000
Telefax +49 (0)30-2020 6000
www.gdv.de

■ **Institut für technische Sicherheit - SCHUTZ HAUS**

Siebenbrunnengasse 21 A
1050 Wien
Österreich
Telefon +43 (0)1 544 25 02 23
Telefax +43 (0)1 544 25 02 43
www.kfv.or.at

■ **Sicherheitsinstitut**

Nüscherstrasse 45
8001 Zürich
Schweiz
Telefon +41 (0)1 217 43 33
Telefax +41 (0)1 211 70 30
www.swissi.ch

Verlag:
VdS Schadenverhütung GmbH
Amsterdamer Str. 174
50735 Köln
Telefon +49 (0) 221 77 66 369
Telefax +49 (0) 221 77 66 109
www.vds.de
© 2000 by VdS

Bemessungsbrände

für Brandsimulationen und Brandschutzkonzepte

Inhalt

1	Einführung	4
1.1	Zweck	4
1.2	Allgemeines	4
2	Begriffe	5
3	Erforderliche Vorüberlegungen für Brandsimulationsberechnungen und Konkretisierung der Schutzziele	6
3.1	Zu schützende Interessen	6
3.2	Beschreibung und Quantifizierung von Schutzzielen	6
3.3	Maximal akzeptable Brandwirkung vereinbaren und Randbedingungen festlegen	8
4	Bemessungsbrand-Szenarien	10
4.1	Allgemeines	10
4.2	Identifizierung wichtiger Brandszenarien und Auswahl für rechnerische Analysen	10
5	Bemessungsbrände	12
5.1	Allgemeines	12
5.2	Rechnerisch ermittelte Bemessungsbrände	13
5.3	Vereinbarte Bemessungsbrände	14
5.4	Bemessungsbrände aus speziellen Brandversuchen.	15
5.5	Ansätze zur Abschätzung der Sprinklerwirkung auf die Brandentwicklung	16
6	Literatur/Quellen	17
7	Anhang	19

1 Einführung

1.1 Zweck

Individuelle Brandschutzkonzepte werden in der Regel erforderlich, wenn für Gebäude besonderer Art oder Nutzung spezielle bauordnungsrechtliche Vorschriften nicht existieren oder wenn einige Punkte solcher Vorschriften nicht umgesetzt werden sollen oder können. Gesamtbrandschutzkonzepte haben generell zum Ziel, mit alternativen Brandschutzmaßnahmen das bauordnungsrechtlich erforderliche Sicherheitsniveau herzustellen. Brandsicherheitsnachweise können heute mit Ingenieurmethoden erbracht werden, die neben bestimmten Modellannahmen auch Annahmen für die Brandszenarien und für sogenannte «Bemessungsbrände» verwenden. Die ingenieurgemäße Auseinandersetzung mit den Schutzziele des Vorbeugenden Brandschutzes und mit den maßgebenden Eingangsgrößen für Brandsimulationen bilden den Kern der nachfolgenden Ausführungen

Es werden einige wesentliche Hintergründe des modernen Brandschutzingenieurwesens erläutert und Hilfestellungen für die Anwendung von Modellen gegeben. Neben Hinweisen für den direkten Anwender von Modellen wird auch auf die erforderlichen Vereinbarungen im Vorfeld von Berechnungen näher eingegangen und es sind Hilfen aufgezeigt für die Kontrolle von Ergebnissen, die mit modernen Ingenieurmethoden erzeugt wurden.

Im Anhang werden aus der Literatur Zahlenwerte zusammengestellt, die für die praktische Lösung von Ingenieuraufgaben im Brandschutz als erste Anhaltswerte näherungsweise herangezogen werden können. Die Festlegung von Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbränden erfordert jedoch eine individuelle Betrachtung entsprechend der textlich gefassten Empfehlungen.

1.2 Allgemeines

Mit Brandsimulationen können Aussagen über die Auswirkungen von ganz bestimmten Brandereignissen getroffen werden. Hierfür ist es erforderlich, sich zunächst mit der verbalen Beschreibung der zu untersuchenden Ereignisse (Bemessungsbrandszenarien) und danach mit der ingenieurmäßigen, quantitativen Konkretisierung dieser Vereinbarungen (Bemessungsbrände) zu befassen. Bemessungsbrände sind auch sehr nützlich für die Risikermittlung (Abschätzung des Schadens nach einer bestimmten Branddauer). Bemessungsbrände können verwendet werden, um die Konsequenzen ab-

zuschätzen, wenn beispielsweise Sicherheitskomponenten wie Rettungswege, Brandmelder oder Löschanlagen ausfallen.

Vor jeder speziellen brandschutztechnischen Analyse müssen die wesentlichen Entwurfsparameter des zu beurteilenden Gebäudes bekannt sein oder angenommen werden. Die charakteristischen Merkmale können in der Regel den Entwurfszeichnungen entnommen werden; hierzu gehören mindestens die Abmessungen, Geschossigkeit und innere Gliederung sowie die Rettungs- und Angriffswege. Sofern Teile des Gebäudes mit aktiven Maßnahmen (z.B. Sprinkleranlagen, Brandmeldeanlagen, Feuerschutzabschlüssen, Lüftungs- und Klimaanlage) versehen sind, sind auch deren wesentliche Eigenschaften für die Risikoanalyse aufzunehmen. Von den Benutzern muss mindestens die voraussehbare Zahl, die Mobilität und die Verteilung im Gebäude bekannt sein, um die bekannten Informationen über deren Verhaltensweisen bei Brandereignissen ingenieurmäßig anwenden zu können. Ferner sind Annahmen über die Art, Menge und Anordnung von brennbaren Materialien zu treffen und mit den Nutzern und Genehmigungsbehörden abzustimmen, da sie für die späteren Berechnungen und für die Akzeptanz der daraus abgeleiteten Brandschutzkonzepte von wesentlicher Bedeutung sind. Ebenso sind mit den am Bau Beteiligten die den Rechnungen zugrunde zu legenden Brandereignisse abzustimmen. Veränderungen dieser Parameter während der Nutzungsdauer der Gebäude können andere Brandschutzkonzepte erforderlich machen und bereits erteilte Genehmigungen in Frage stellen. Daher sind die den Risiken angepassten und optimierten Brandschutzkonzepten zugrunde gelegten Annahmen in regelmäßigen Zeitabständen von einem Fachmann zu überprüfen.

Dieser Beitrag soll dazu beitragen, die Verständigung der von der Entwicklung und Genehmigung (Akzeptanz) schutzzielorientierter Brandschutzkonzepte betroffenen Personen und Stellen zu erleichtern. Es wird auf die Belange des Personenschutzes und des Sachwertschutzes gleichermaßen eingegangen und neben den Aspekten der Brandszenarien und Bemessungsbrände werden auch Überlegungen hinsichtlich der Schutzzieldefinition und der Akzeptanzkriterien dargestellt.

2 Begriffe

Bemessungsbrand-Szenarien (design-fire scenarios): Qualitative Beschreibung der Zündart und der weiteren möglichen Entwicklung des Feuers in einem Raum oder Gebäude. Meistens enthält diese Beschreibung die zusätzlichen Angaben betreffend Raum-Gebäude-Struktur (Geometrie, räumliche Abmessungen, Bauart), Belüftungs-/ Ventilationsbedingungen (Stellung der Türen/Fenster und anderer permanenter Öffnungen, die als Zuluft dienen können), eventueller Einfluss der Brandmelde-/Sprinkleranlage, das mögliche Verhalten von Personen und Feuerwehkräften.

Bemessungsbrände (design-fires): Quantitative Beschreibung des möglichen Brandverlaufs in Form von zeitabhängigen, spezifischen Parametern (Wärmefreisetzungsrate, Flammenhöhe, Rauchentwicklungsrate usw.). In den meisten Fällen handelt es sich um eine brandlastgesteuerte Verbrennung mit unbeschränkter Luftzufuhr, wobei die Wärmefreisetzungsrate von Menge, Wesen, räumlicher Aufteilung der brennbaren Stoffe/Gegenstände abhängt.

Verfügbarkeit: Verhältnis der Zeit, in der eine Sicherheitseinrichtung (z.B. eine Sprinkleranlage) voll funktionsfähig ist zur gesamten Zeit, für die die Funktionsfähigkeit gefordert ist.

Beispiel: Eine Sprinkleranlage in einem Hochhaus muss aus Wartungsgründen im Jahr für 20 Stunden außer Betrieb genommen werden. Ansonsten steht die Sprinkleranlage durchgehend funktionsbereit zur Verfügung.

Verfügbarkeit = $8740h/8760h = 0,9977$
($V=99,77\%$)

Zuverlässigkeit: Zahlenwert, der angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Sicherheitseinrichtung im Bedarfsfall ihre bestimmungsgemäße Wirkung entfalten wird.

Beispiel: Aus Schadenstatistiken kann abgeleitet werden, dass Sprinkleranlagen in 98% der Fälle einen Brand löschen bzw. unter Kontrolle halten. Somit kann die Zuverlässigkeit von Sprinkleranlagen mit 98% angenommen werden.

Risiko (R): Risiko als Zahlenwert umschreibt die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines nicht gewünschten Zustands innerhalb eines definierten Zeitraums.

$R = 0$ Zustand tritt innerhalb des definierten Zeitraums nicht ein

$R = 1$ Zustand tritt innerhalb des definierten Zeitraums ein

(Im versicherungstechnischen Sinn wird unter Risiko das Produkt aus Schadenhöhe und Eintrittswahrscheinlichkeit verstanden.)

Sicherheit (S): Sicherheit als Zahlenwert umschreibt die Wahrscheinlichkeit des «Nichteintritts» eines nicht gewünschten Zustands innerhalb eines definierten Zeitraums.

$S = 1 - R$

Flashover: Übergangsphase in der Entwicklung eines Raumbrandes, in der alle Oberflächen von brennbaren Stoffen mehr oder weniger gleichzeitig durch Strahlungswärme über den Zündpunkt erhitzt und entzündet werden und eine rasche Brandausbreitung erfolgt (siehe auch Tabelle 4) [1,2].

Backdraft: Plötzliches Entzünden von in einem Raum eingeschlossenen heißen gasförmigen Produkten einer unvollständigen Verbrennung durch plötzliche Luftzufuhr [2].

Für einen Backdraft sind folgende Elemente bzw. Abläufe erforderlich:

- weitgehend abgeschlossener Raum
- Brand unter Sauerstoffmangel und daraus resultierende unvollständige Verbrennung, Bildung brennbarer Gase
- im Raum sind heiße, brennbare Gase, eine Zündflamme (bzw. Glut), jedoch ist für das Verbrennen der Gase zu wenig Sauerstoff vorhanden
- beim Zutritt von Luft (z.B. Öffnen einer Türe) kommt es zum plötzlichen – oft explosionsartigen – Durchzünden der brennbaren Gase

3 Erforderliche Vorüberlegungen für Brandsimulationsberechnungen und Konkretisierung der Schutzziele

3.1 Zu schützende Interessen

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 [3]
 - Persönliche Sicherheit der an Brandbekämpfungs- und Rettungsaktionen beteiligten Personen
- 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
 - Problemen beim Wiederaufbau, da in vielen Fällen eine Betriebsanlagengenehmigung erwirkt werden muss

- Optimierung der Kosten für die Versicherungsdeckung durch Präventivmaßnahmen

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 Zeit der Tragfähigkeit der Baukonstruktion,
- definierte Begrenzung der Brand- und Rauchausbreitung,
- definierte Zeit für die Entdeckung eines Brandes,
- definierte Hilfsfrist und Stärke einer Intervention usw.

Das Schutzziel beschreibt, was technisch erreicht werden soll, das Schutzinteresse beschreibt, warum etwas erreicht werden soll.

3.2 Beschreibung und Quantifizierung von Schutzzielen

Die am Bau Beteiligten und sonstige für die Sicherheit von Gebäuden und Anlagen zuständigen Personen und Gruppen haben verschiedene Vorstellungen und Erwartungen hinsichtlich der sicherheitstechnischen Relevanz der betreffenden Objekte. In der Regel wird unter Brandschutzgesichtspunkten zwischen Personenschutz, Umweltschutz und Sachwertschutz unterschieden. Sofern diese Teilaspekte des Brandschutzes unabhängig voneinander geregelt und Anforderungen aufgestellt werden, können Sicherheitslücken und Widersprüche durch Doppelregelungen entstehen. Die sicherheitstechnischen Fragestellungen, die mit einem bestimmten Objekt verbunden sind, sollten zumindest in der Planungs- und Entwurfsphase ganzheitlich erfasst und mit einem ganzheitlichen Schutzkonzept einvernehmlich gelöst werden. Alle Beteiligten sind daher aufgefordert, ihre Erwartungen klar zu formulieren und möglichst zahlenmäßig zu konkretisieren. Als Muster für eine erste Annäherung könnte folgende Zusammenstellung aus Tabelle 1 [4] dienen.

Tabelle 1: Beispiel für eine Konkretisierung von Schutzziele

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

Überzogene Erwartungen und Sicherheitslücken können so gemeinsam erkannt und praxisgerecht ersetzt bzw. ergänzt werden. Als akzeptables Restrisiko gilt beispielsweise eine Todesfallrate von 5 bis 10 Brandtoten pro 1 Million Einwohner und Jahr in Europa. An diesen Zahlen gemessen wird das mittlere europäische Brandsicherheitsniveau allgemein als ausreichend bewertet.

Wenn im Einzelfall ein auf ein bestimmtes Objekt, seine spezifische Nutzung und seine Benutzer angepasstes und optimiertes Brandschutzkonzept entworfen und genehmigt werden soll, so muss über die Schutzziele und über das erforderliche Sicherheitsniveau Klarheit und Einigkeit herrschen. Eine vermehrte Anwendung ingenieurmäßiger Methoden im Brandschutzwesen bedingt zum Teil Veränderungen bei den gewohnten Brandschutzvorschriften: quantitative Analyse- und Bewertungsverfahren erfordern ebenso quantifizierbare Vorgaben und Beschreibungen der Schutzziele und Grenzwerte!

Nun sind die am Bau Beteiligten gefordert, ihre sicherheitstechnischen Zielsetzungen eindeutig miteinander abzustimmen und zu vereinbaren. Es reicht also nicht mehr aus, beispielsweise festzuschreiben, wie lang ein Rettungsweg maximal sein darf, sondern es müsste genau formuliert werden, wie viele Personen in welcher Zeit nach der Brandentdeckung sicher aus dem gefährdeten Bereich zu evakuieren sind. Dabei spielt natürlich unter anderem auch die Leistungsfähigkeit und Anzahl von Personen sowie andere Kenngrößen eine wesentliche Rolle. Da eine 100-prozentige Sicherheit für alle im Ernstfall vom Brand betroffenen Personen kaum erreichbar ist und aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht angestrebt werden kann, muss an dieser Stelle auch eine Angabe zum akzeptierten Restrisiko gemacht werden.

Brandschutzkonzepte decken die üblichen Brandgefahren und Szenarien ab und dienen der Sicherung der Schutzinteressen. Für außergewöhnliche Szenarien (Brandstiftung, Brandan-

schläge, Flugzeugkatastrophen) müssen Sonderkonzepte entwickelt werden.

Für die Evakuierungsplanung eines Gebäudes sollten mindestens Aussagen über die für die Evakuierungsmaßnahmen zur Verfügung stehenden Zeiträume gemacht werden, wobei die noch akzeptierten Brandeinwirkungen auf Personen im Brandbereich (wie Grenzwerte für die Wärmeeinwirkung, die Raucheinwirkung – insbesondere Kohlendioxid und Kohlenmonoxid – und die Mindestsichtweiten) vorgegeben werden sollten. Vor dem Hintergrund der Unsicherheiten der zugrunde gelegten Annahmen – insbesondere über die Bemessungsbrände – ist jedoch sicherzustellen, dass gerade für den Personenschutz durch entsprechend hohe Sicherheitsbeiwerte und andere Faktoren politisch-ethisch vertretbar auch auf die individuell unterschiedlichen Verträglichkeiten für Einwirkungen Rücksicht genommen wird! Ferner sollte das Risiko für die Nutzer angegeben werden können, in einem Brandfall nicht mehr in Sicherheit zu gelangen.

Bei der Festlegung der erforderlichen Grenzwerte kann der Brandschutzingenieur seine Erfahrungen und Fachkenntnis einbringen; zuständig für die Akzeptanz solcher Grenzwerte sind allerdings die Genehmigungsbehörden. Für eine umfassende Anwendung ingenieurmässiger Methoden liegen noch längst nicht für alle wesentlichen Brandschutzaufgaben die erforderlichen Grenzwerte vor. Hier sind die politischen Gremien aufgefordert, ihre Sicherheitsziele zu quantifizieren und Wissenslücken durch entsprechende Forschungsaufträge zu schließen. Entscheidungsträger müssen sich für die Vergabe und für die Kontrolle von Aufträgen an Brandschutzingenieure hinreichend qualifizieren, um die sicherheitstechnische Bedeutung und die wirtschaftlichen Konsequenzen quantitativer Vor- und Angaben zutreffend beurteilen zu können.

Schutzziele ergeben sich zunächst aus den rechtsverbindlichen Forderungen z.B. des Bauordnungsrechts; sie betreffen in erster Linie den Personenschutz, den Nachbarschaftsschutz und den Umweltschutz. Das Brandschutzingenieurwesen in Verbindung mit «performance-based codes» [5] verschafft dem Planer zusätzlich verbesserte Möglichkeiten, auch den Wert eines Brandschutzkonzeptes im Hinblick auf den Sachwertschutz aufzuzeigen und anschließend (oft mit nur geringem zusätzlichen Aufwand) erheblich zu verbessern. Der Betreiber einer baulichen Anlage ist also aufgerufen, diese Möglichkeit zu nutzen und seine Sachwert-Schutzinteressen in die Schutzkonzepte mit einbeziehen zu lassen [6].

Hierfür muss er allerdings angeben, welche materiellen Verluste er nicht mehr akzeptieren will oder kann. Hohe Sachschäden werden häufig auch durch den Brandrauch und durch korrosive Brandzersetzungsprodukte hervorgerufen, so dass der Brandschutzingenieur auch Informationen zur Empfindlichkeit des Gebäudeinhaltes gegenüber einer Beaufschlagung mit Brandrauch benötigt.

3.2.1 Konkretisierung von öffentlich-rechtlichen Schutzziele am Beispiel des deutschen Bauordnungsrechts

Die Schutzziele des Bauordnungsrechts sind zum Beispiel in dem § 17 («**Grundnorm des vorbeugenden Brandschutzes**») der Musterbauordnung oder der Bauordnung des Landes Nordrhein-Westfalen [7] beschrieben; dies allerdings so allgemein, dass bei der Interpretation und konkreten Auslegung immer wieder erhebliche Schwierigkeiten und Meinungsverschiedenheiten zwischen den betroffenen Parteien auftauchen. Die Länder formulieren ihre Schutzziele auf der Musterbauordnung aufbauend ähnlich – aber zum Teil unterschiedlich. Daraus ergeben sich bei der Umsetzung in die Praxis selbstverständlich unterschiedliche Erwartungen an das Sicherheitsniveau für den Brandfall in den einzelnen Bundesländern. Die Anwendungssicherheit leidet darunter.

Zitat: Bauliche Anlagen müssen so beschaffen und instand gehalten sein, 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.

Diese Schutzziele müssen erreicht werden «unter Berücksichtigung insbesondere»

- der Brennbarkeit der Baustoffe,
- der Feuerwiderstandsdauer der Bauteile ausgedrückt in Feuerwiderstandsklassen,
- der Dichtheit der Verschlüsse von Öffnungen in abschnittsbegrenzenden, raumabschließenden Bauteilen und
- der Anordnung von Rettungswegen.

Im Klartext geht aus dem § 17 MBO hervor, dass der Brandschutz primär dem Schutz von Menschenleben dient und mit den passiven Maßnahmen des baulichen Brandschutzes im Zusammenwirken mit dem abwehrenden Brandschutz (der Leistungsfähigkeit der öffentlichen Feuer-

wehren) erreicht werden kann. Maßnahmen des anlagentechnischen Brandschutzes werden primär im Bauordnungsrecht nicht verlangt.

Im Bauordnungsrecht sucht man vergebens nach einer Konkretisierung der Schutzziele im Sinne einer Quantifizierung. Es bleibt unklar, in wieviel Minuten ein Gebäude geräumt oder evakuiert sein muss oder welche Einwirkungen von Rauch und Wärme den Menschen zugemutet werden dürfen. Konkrete Angaben über das Restrisiko werden nicht gemacht, so dass ein Entwurfsverfasser und die Genehmigungsinstanz nicht wissen, mit welcher Wahrscheinlichkeit im Falle eines Brandes wie viele Personen verletzt werden oder welchem Risiko für ihr Leben sie ausgesetzt werden. Ein Vergleich der Personensicherheit in einem Kaufhaus, das nach der alten oder der neuen Muster-Verkaufsstättenverordnung errichtet worden ist, kann also nicht zahlenmäßig erfolgen. Die Veränderung des Sicherheitsniveaus durch modifizierte Vorschriften kann nicht quantifiziert werden.

Im folgenden wird versucht, aus der Fachliteratur einige bekannte Werte zusammenzustellen, die Anhaltspunkte für ingenieurmäßiger Brandschutzüberlegungen darstellen. Mit Hilfe solcher Zahlen kann ermittelt werden, ob vorhandene oder geplante Schutzkonzepte in der Praxis das gewünschte Sicherheitsniveau – also das gewünschte Schutzziel – erreichen.

3.3 Maximal akzeptable Brandwirkung vereinbaren und Randbedingungen festlegen

Die Quantifizierung von Schutzziele erfordert zunächst die Festlegung der Arten und der Mengen von Brandeinwirkungen auf die zu schützenden Güter dergestalt, dass diese Festlegungen gleichzeitig die akzeptablen Verluste und Schäden beschreiben und als Leistungskriterien für die Brandschutzkonzepte verwendet werden können. Diese Kriterien können beispielsweise ausgedrückt werden in Form von:

- Wärmestrahlung (z.B. aus der Heißgasschicht),
- Wärmefreisetzung,
- Konzentration von toxischen oder korrosiven Gasen oder
- Sichtweiten.

Falls als Schutzziel «Keine Brandtoten außerhalb des Raumes der Brandentstehung» vorgegeben ist, dann muss das Brandschutzkonzept sicherstellen, dass auf allen Rettungswegen bis zur endgültigen Evakuierung aller Benutzer in sichere Bereiche angemessene, sichere Zustände

Schutzziel	Beispiele für eine Konkretisierung
Die Zahl der Brandtoten begrenzen	Maximal 10 Tote pro Jahr und 1 Million Einwohner.
Die Versagenswahrscheinlichkeit der Bauteile von Industriebauten begrenzen	Für die DIN 18230 (1987) sind für Industriebauten die folgenden Werte angenommen und vorausgesetzt worden: Für mehrgeschossige Bauwerke: SK _{b3} : 10 ⁻⁶ ; SK _{b2} : 10 ⁻⁵ ; SK _{b1} : 10 ⁻⁴ Für eingeschossige Bauwerke: SK _{b3} : 10 ⁻⁵ ; SK _{b2} : 10 ⁻⁴ ; SK _{b1} : 10 ⁻³ Tragende Bauteile werden entsprechend ihrer Bedeutung einer Brandsicherheitsklasse SK _{b1} (geringe Anforderungen) bis SK _{b3} (hohe Anforderungen) zugeordnet.
Das Auftreten gefährlicher (Voll-) Brände begrenzen	Für die DIN 18230 (1987) sind für Industriebauten die folgenden Werte angenommen und vorausgesetzt worden: 2·10 ⁻⁷ pro Jahr und m ² bei Vorhandensein einer öffentlichen Feuerwehr
Die Brandentstehungswahrscheinlichkeit begrenzen	Für die DIN 18230 (1987) sind für Industriebauten 2·10 ⁻⁶ pro Jahr und m ² angenommen und vorausgesetzt worden.
Der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen	Die eigenständige Flucht der Personen muss innerhalb von 10 Minuten möglich sein [8].
Beherrschung eines kritischen Brandes (Zimmerbrand in einem OG mit der Tendenz zur Ausbreitung; erster Rettungsweg ist f. d. Bewohner unpassierbar; Gefahr für Leib und Leben)	Menschenrettung auf zwei voneinander unabhängigen Wegen (verqualmter Treppenraum und über Leiter der Feuerwehr) spätestens 8 Minuten nach Alarmierung (≥ 10 Einsatzkräfte) Verhinderung der Brandausbreitung und des Flash-over spätestens 13 Minuten nach Alarmierung (≥ 16 Einsatzkräfte) [9]
Rettung von Personen aus brennenden Gebäuden	Sicherer Aufenthalt in gesicherten Bereichen bis zur Rettung durch die Feuerwehr (Brandauern von 30 bis 60 Minuten)

Parameter	Grenzwert	Grenzwert mit Sicherheitsfaktor *
Lufttemperatur **	< 65 °C	< 50°C
CO-Konzentration **	< 1400 ppm	< 700 ppm
CO ₂ -Konzentration **	< 6 Vol.-%	< 5 Vol.-%
Sauerstoff **	> 12 Vol.-%	> 14 Vol.-%
Höhe der rauchfreien Schicht	> 1,50 m	> 1,80 m
Sichtweite	> 10 m	> 20 m
* willkürliche Werte		
** Es wird angenommen, dass bei Einhaltung dieser Grenzwerte «normale» Personen die Brandwirkungen über einen Zeitraum von 30 Minuten schadlos überstehen. Die Verwendung derartiger Grenzwerte ist in jedem Einzelfall gesondert zu prüfen und zu vereinbaren.		

Parameter	Grenzwert	Grenzwert mit Sicherheitsfaktor *
Wärmestrahlung auf den Boden außerhalb des Raumes der Brandentstehung	< 20 kW/m ²	< 5 kW/m ²
Temperatur der Heißgasschicht	< 600 °C	< 300°C
* willkürliche Werte		

herrschen. Vorgaben für ingenieurmäßiger Arbeitsweisen wären dann zum Beispiel:

- zulässige Wärmestrahlung (kW/m²)
- Sauerstoff-Konzentration (Vol.-%)
- CO₂-Konzentration (Vol.-%)
- CO-Konzentration (ppm)
- Höhe der rauchfreien Schicht (m)
- minimale Sichtweite (m)
- oder andere Faktoren.

Falls für den Sachwertschutz das Schutzziel lautet «Keine Brandausbreitung außerhalb des Raumes der Brandentstehung», dann kann nach dem gleichen Verfahren vorgegangen werden.

4 Bemessungsbrand-Szenarien

4.1 Allgemeines

Sicherheitsbetrachtungen sollten sich entsprechend der zu erfüllenden Schutzziele an den betreffenden möglichen Brandsituationen orientieren. Für Baugenehmigungsfragen könnten 90%-Fraktilwerte und für Versicherungsfragen Worst Case Betrachtungen geeignete Grundlagen darstellen.

4.2 Identifizierung wichtiger Brandszenarien und Auswahl für rechnerische Analysen

Im folgenden wird ein systematisches Verfahren empfohlen, mit dem sich mögliche Bemessungsbrandszenarien identifizieren lassen:

Schritt 1 – Brandtyp

Aufgrund von Schadenerfahrungen werden für die betreffende Art des Gebäudes und seiner Nutzung folgende Informationen abgeleitet:

- a) häufige Brandursachen
- b) Brandszenarien mit folgenschweren Schäden (z. B. Entstehungsbrandszenarien für Brände mit mehreren Brandtoten oder mit besonders hohem Sachschaden)

Der wahrscheinlichste Brandtyp lässt sich festlegen, indem man die am häufigsten an Entstehungsbränden beteiligten Stoffe, die Zündquellen und die Brandentstehungsorte entsprechender Brände betrachtet. Sofern vorhanden, können Statistiken wertvolle Informationen liefern.

Das Brandszenario mit wahrscheinlich großen Konsequenzen kann festgelegt werden auf der Basis von Brandstatistiken mit entsprechenden Aus-

sagen über Schäden an Personen oder Sachen. Von diesen Großschäden, die auf das betreffende Gebäude und seine Nutzung angewendet sein können, sollte der am häufigsten vorkommende Typ ausgewählt werden.

Sofern nationale Statistiken mit den erforderlichen Informationen nicht vorhanden sind, können eventuell ähnliche Statistiken anderer Länder mit ähnlicher Schadenerfahrung genommen werden. Bei der Verwendung von statistischem Datenmaterial ist äußerste Vorsicht angeraten; es muss sichergestellt sein, dass die verwendeten Daten auf das näher zu untersuchende Gebäude auch tatsächlich angewendet werden können.

Schritt 2 – Ort der Brandentstehung

Für jedes im Schritt 1 identifizierte Brandszenario sind die möglichen Orte für die Brandentstehung zu betrachten. Daraus ist das Brandszenario mit den für das jeweilige Schutzziel schlimmsten Folgen auszuwählen.

Von den unendlich vielen und sehr unterschiedlichen Brandereignissen müssen eine begrenzte Zahl für die rechnerischen Untersuchungen ausgewählt werden. Die Szenarien lassen sich unterteilen in Brände, die außerhalb und die innerhalb des Gebäudes entstehen. Typische Beispiele sind:

- Brände, die in den Raumecken entstehen
- einzelne, brennende Gegenstände oder Objekte
- Brände in Kabelanlagen
- Brände in besonderen Raumkonfigurationen wie Atrien, Tunnels oder Messehallen
- Brände in Dach- und Deckenhohlräumen oder unter Dächern und Decken
- Fassadenbrände
- Brände, die von angrenzenden Gebäuden, Freilagern oder Autos durch Wärmestrahlung oder durch Flugfeuer eventuell auch über das Dach auf das Gebäude einwirken

Schritt 3 – Besondere Brandgefahren

Erkennen zusätzlicher kritischer Szenarien mit großen Konsequenzen. Diese Szenarien treten typischerweise bei folgenden Verhältnissen auf:

- Brände in Versammlungsstätten
- Brände innerhalb von Rettungswegen
- Brände, die Fluchttüren unpassierbar machen
- Brände, die zu Einstürzen der Tragkonstruktionen führen
- Brände, die sehr gefährliche Stoffe betreffen

Tabelle 5: Faktoren, die das Brandszenario beeinflussen	
Ausgangssituation:	Angaben über das Gebäude, seine Unterteilung in Brandabschnitte und andere brandschutztechnisch abgetrennte Bereiche, der Zustand und die Bauweise
Zündquellen:	Temperaturen, Zündenergien, Zeitdauer und Flächen der den Zündquellen ausgesetzten brennbaren Stoffe
zuerst in Brand geratene Gegenstände:	Aggregatzustand (auch Dämpfe), Oberflächen zu Masse Verhältnis, Wärmefreisetzungsrate
mitbrennende Brandlasten:	Abstand zu den zuerst in Brand geratene Gegenständen, Art, Menge und Verteilung
Brandausbreitungsmöglichkeiten:	über den «Brandraum» hinaus
Aufenthaltsorte der zu schützenden Personen und Objekte:	Feststellung aller zu schützender Objekte oder Bereiche, für die Schutzziele vorgegeben sind entlang der zu erwartenden, vom Brand betroffenen Bereiche (Wärme, Rauch)
Zustand der Personen:	schlafend, wachsam und mobil, behindert, hohes oder sehr niedriges Alter
weitere Parameter, die die Brandentwicklung beeinflussen:	Ventilationsverhältnisse (Türen, Fenster: offen oder geschlossen), Lüftungs- und Klimaanlage (ein- oder ausgeschaltet), Tageszeit, Umwelteinflüsse (Wind, Temperaturen, Druckverhältnisse bei hohen Gebäuden), Brandbekämpfung durch Personen oder Löschanlagen, Wirkungsweise von Frühwarnsystemen im Raum der Brandentstehung
Statistisches Zahlenmaterial:	Brandentstehungswahrscheinlichkeiten, Versagenswahrscheinlichkeiten

- Brände mit außergewöhnlich schneller Brandausbreitungsgeschwindigkeit.

Wenn von diesen Szenarien einige möglicherweise gefährlicher sein können als die zuvor festgestellten, müssen sie in die Liste der konkret zu untersuchenden Szenarien aufgenommen werden. Sie können ggf. andere gefährliche Szenarien ersetzen, wenn diese ähnliche Verhältnisse widerspiegeln.

Schritt 4 – Brandbeeinflussende Faktoren (z. B. Maßnahmen und Systeme)

Für den Brandschutzingenieur sind möglichst umfassende Angaben über alle Parameter wichtig, die das Brandgeschehen oder die Schutzziele betreffen können; insbesondere sind dies: siehe Tabelle 5

Schritt 5 – Verhalten der Gebäudenutzer

Feststellen der Charakteristika und von Reaktionsmerkmalen der Gebäudenutzer, die wahrscheinlich einen signifikanten Einfluss auf ihre Fähigkeit, in Notlagen zu agieren, haben. Typischerweise sollten folgende Faktoren Beachtung finden:

- der Gebäudenutzer reagiert auf Alarmmeldungen (normale oder verzögerte Reaktion),
- der Gebäudenutzer bemerkt und reagiert auf Branderscheinungen wie Flammen und Rauch

(Reaktion normal oder verspätet bzw. verzögert),

- Mobilität der Gebäudenutzer (normal oder beeinträchtigt),
- manuelle Brandbekämpfung (erfolgreich oder nicht erfolgreich).

Schritt 6 – Ereignisbaum

Die Beschreibung von Bemessungsbrandszenarien sollte auf deterministische aber auch auf probabilistische Überlegungen eingehen. Es handelt sich dabei um eine möglichst vollständige Beschreibung eines speziellen Brandszenarios von der Brandentstehung über den voll entwickelten Brand bis hin zum endgültigen Brandschaden. Eine vollständige Beschreibung der Bemessungsbrandszenarien enthält

- Angaben zur Schwelbrandphase,
- Angaben zur Brandausbreitungsphase,
- Angaben zur Vollbrandphase,
- Angaben zur Brandphase mit abnehmender Intensität bis zum Ausbrennen oder Löschen.

Erstellen eines Ereignisbaumes, der die als signifikant erkannten Faktoren beinhaltet. Jeder Weg durch diesen Ereignisbaum spiegelt ein zu untersuchendes Brandszenario wider.

Ereignisbäume können so erstellt werden, dass man mit dem Zündereignis beginnt; dann wird eine Gabel mit Ästen angehängt, die jedes kritische Stadium des nächsten Ereignisses wiedergeben. Dieser Prozess (Gabel + Äste) wird so lange wiederholt, bis alle Ereignisse eingezeichnet sind. Es wird darauf hingewiesen, dass die Summe aller Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ereignisse an jeder Gabel sich zu eins (oder 100%) addiert; die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten bereitet in der Praxis häufig so große Schwierigkeiten, dass sie anhand von Erfahrungswerten vom Sachverständigen geschätzt werden muss. Jede Verzweigung wird gebildet auf der Basis des vorhergehenden Geschehens.

Schritt 7 – Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien

Die relative Eintrittswahrscheinlichkeit eines jeden Szenarios ergibt sich als Produkt aller Einzelwahrscheinlichkeiten entlang des Ereignispfades für das jeweilige Szenario.

Schritt 8 – Betrachtung der Brandfolgen

Die Brandfolgen sollten ingenieurmäßig abgeschätzt werden. Als zu bewertende Brandfolgen bieten sich die Zahl von Brandopfern oder die wahrscheinliche Höhe eines Sachschadens an. Die Schätzwerte sollten konservativ angenommen werden.

Schritt 9 – Risikobetrachtung

Die Szenarien sollten in der Reihenfolge der Schwere der Konsequenzen aufgelistet werden. Als Risikokennziffer kann eine Verknüpfung der Brandfolgen (Schritt 8) mit der Eintrittswahrscheinlichkeit (Schritt 7) des jeweiligen Szenarios herangezogen werden.

Schritt 10 – Auswahl und Dokumentation bei der letztendlichen Festlegung der zu untersuchenden Szenarien

Für eine quantitative Analyse sollten die Genehmigungsbehörden und die Versicherer mit dem Brandschutzingenieurteam zusammenarbeiten. Für sehr genaue Analysen kann es erforderlich werden, alle Szenarien näher zu betrachten. Die ausgewählten Brandszenarien stellen die Bemessungsbrandszenarien dar.

5 Bemessungsbrände

5.1 Allgemeines

Neben der qualitativen Beschreibung der Brand-szenarien und der Brandentstehungsorte ist eine quantitative Vorgabe der Brandentwicklung erforderlich. Sie beschreibt die wesentlichen Brandparameter in ihrer zeitlichen Entwicklung. Meist wird die Wärmeentwicklung als wichtigste Informationsquelle herangezogen («rate of heat release -RHR-»). Die verschiedenen Brandentwicklungsstadien sind in Abbildung 1 dargestellt. Wichtig ist nun die Auswahl der entscheidenden Brandparameter und die zu untersuchenden Brandentwicklungsphasen. Auch hierzu sollte unbedingt eine Einigung aller am Bau beteiligten Stellen herbeigeführt werden.

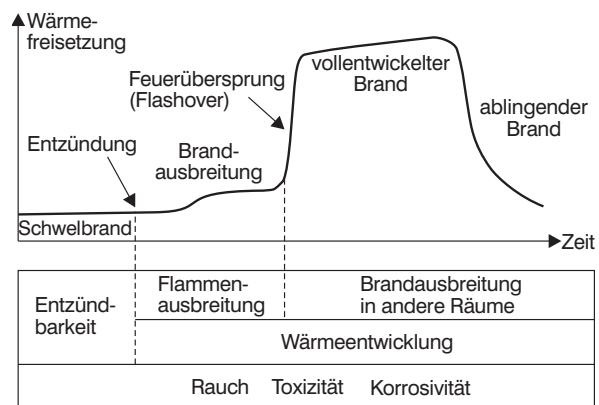


Abbildung 1: Brandentwicklungsphasen

Für die Belange des Personenschutzes ist im allgemeinen die Brandausbreitungsphase von besonderer Bedeutung, während die Aspekte des Sach- und Umweltschutzes unter Berücksichtigung des vollständigen Brandereignisses bewertet werden müssen.

Bevor man damit beginnt, die Brandentwicklung zahlenmäßig zu beschreiben, ist es wichtig, den Charakter des Brandszenarios zu erkennen und danach die entscheidenden Parameter festzulegen. Zum Beispiel kann

- die Wärmefreisetzungsrate,
- die (flächenhafte) Brandausbreitungsgeschwindigkeit,
- die Maximaltemperatur oder
- die Rauchentwicklung als Massenfreisetzung

entscheidend sein.

Im Rahmen von modernen Brandsimulationen kann die zeitliche Entwicklung wichtiger Brandparameter mit einem hohen Grad an Genauigkeit abgeschätzt werden. Üblicherweise ist die zentrale Größe für Brandsimulationen nach der Wärmebilanztheorie die Wärmefreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit. Die Wärmefreisetzung-/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.

5.2 Rechnerisch ermittelte Bemessungsbrände

Sofern über das zu untersuchende Brandereignis nicht ausreichend genaue oder viele Informationen vorliegen, kann mit ingenieurmäßiger Verfahren die Brandentwicklung näher untersucht werden und die fehlenden Daten für die Entwurfs- oder Analyseaufgabe näherungsweise ermittelt werden (s. Abbildung 2).

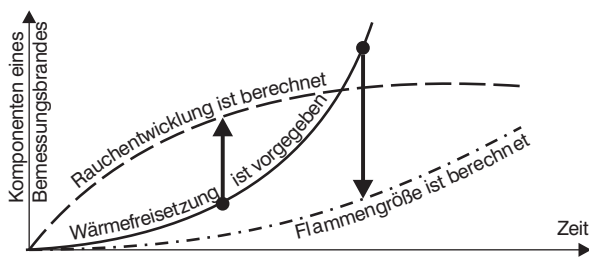


Abbildung 2: Ingenieurmäßiger Ermittlung von Brandkenngrößen eines Bemessungsbrandes auf der Basis der angenommenen Wärmeentwicklung

Wenn Einigkeit über die zur Lösung der Probleme erforderlichen Brandkenngrößen und ihrer zeitlichen Entwicklung bestehen, können in sich konsistente Ansätze über das Brandgeschehen zur Basis weiterer Untersuchungen und Entwurfsarbeiten herangezogen werden. Üblicherweise werden Probleme wie

- die Stabilität der Konstruktion des Brandraumes,
- die Entdeckung des Brandes mit Rauch- oder Flammenmeldern,
- die Auslegung von Sprinkleranlagen für Räume und Nutzungen, über die gesicherte Versuchserfahrungen vorliegen

mit direkt vorgebbaren Modellbränden gelöst.

Künftig kann man sich von leistungsfähigen Rechenmodellen erhoffen, dass fehlende und ungenaue Informationen über das Brandereignis beige-steuert oder ertüchtigt werden können. Somit können dann Rechenmodule (s. Abbildung 3) auf eine größere und verbesserte Datenbasis zurückgreifen.

Die Festlegung von Bemessungsbränden anhand von rechnerischen Voruntersuchungen beinhaltet zur Zeit noch eine Reihe von Unsicherheiten und ist daher der Verwendung von experimentellen Daten oder von Erfahrungswerten nicht in jedem Fall überlegen. Die Vorhersage der Brandentwicklung ist mit den verfügbaren Modellen nur sehr schwer möglich; diese Modelle sind in der Regel für den Zweck entwickelt worden, die Brandauswirkungen eines vorgegebenen Feuers (des Bemessungsbrandes) auf den Raum oder mehrere Räume realistisch abzuschätzen, nicht aber, um das Feuer selber vorherzusagen. International, arbeitet man allerdings mit Hochdruck an der Entwicklung von solchen Modellen, die die Berechnung der Brandentwicklung selber ermöglichen sollen.

Häufig lassen sich aus der Wärmeentwicklung allerdings noch nicht oder noch nicht ausreichend zuverlässig die wichtigen Brandprodukte (wie Rauch bei Schwelbränden) rechnerisch vorhersagen. In diesen Fällen ist man auf Annahmen und auf Versuchsergebnisse ange-

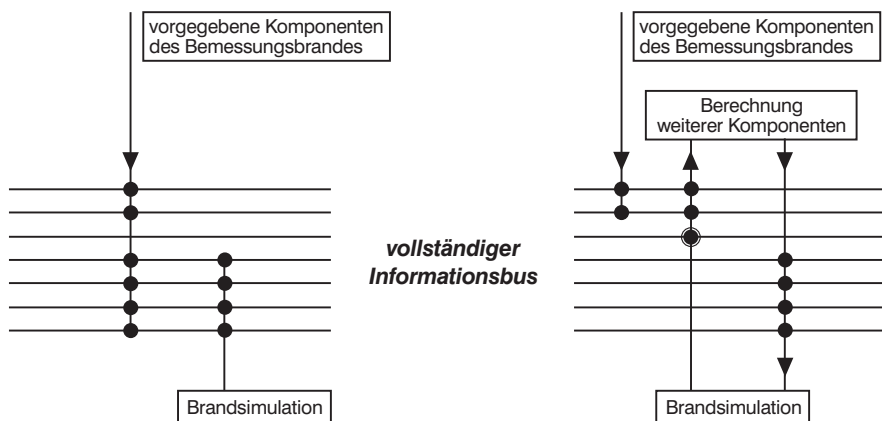


Abbildung 3: Direkter und indirekter Gebrauch der Informationen von Bemessungsbränden im System der ingenieurgemäßen Brandschutzhinweise

wiesen, die allerdings mit der ebenfalls anzunehmenden Wärmeentwicklung korrespondieren müssen. Passen zum Beispiel willkürliche Rechenannahmen über die Rauch- und Wärmefreisetzung nicht zusammen, so kann man die Auslösezeit von Rauchmeldern nicht ausreichend zuverlässig bestimmen; physikalisch falsche Informationen über die Brandwärme, die den angenommenen Rauch entsprechend der physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Thermik nach oben zu den Rauchmeldern befördert, führen zu Fehleinschätzungen. Auch wenn diese Gesetzmäßigkeiten korrekt in den Ingenieurmodellen erfasst sind, so ergeben sich möglicherweise völlig falsche und unsichere Ergebnisse, wenn die Eingangswerte die Situation nicht zutreffend in den wesentlichen Parametern beschreiben.

Für die praktische Arbeit können u. a. folgende Literaturstellen empfohlen werden:

- Brände von leichtbrennbaren Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt von 30.0 °C oder von Flüssigkeiten, die bis auf die Temperatur ihres Flammpunktes vorgewärmt wurden: [12-Mudan, Babrauskas, 14]
- Brände von Feststoffen/festen Gegenständen
 - Schwelbrand [15]
 - Holzpaletten- und Polstermöbel-Brände [12-Babrauskas]
 - Feuerausbreitung zwischen den festen Gegenständen unter deren Wärmeausstrahlung [1,14]

5.3 Vereinbarte Bemessungsbrände

5.3.1 Zeitunabhängige Brände (steady-state fires) mit max. Wärmefreisetzungsrate

Sogenannte «**steady-state fires**» beschreiben die Brandkenngrößen unabhängig von ihrer zeitlichen Entwicklung als konstante Größen über einen festgelegten Zeitraum (s. Abbildung 4). Auf der sicheren Seite liegend wird dann der Maximalwert des Brandkenngrößen/Zeit-Verlaufes für den betrachteten Zeitraum den Berechnungen zugrunde gelegt. Diese Annahme ist sehr konservativ und führt im allgemeinen zu einer Überschätzung der Brandwirkungen.

Annahmen für steady-state Bemessungsbrände [2,8,10,14,15-18]:

- nach Zündung wird die max. Brandleistung rasch erreicht und
- die Wärmefreisetzungsrate bleibt unverändert.

Die Werte in Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 gelten für brandlastgesteuerte Verbrennung mit unbeschränkter Luftzufuhr; die Wärmefreisetzung

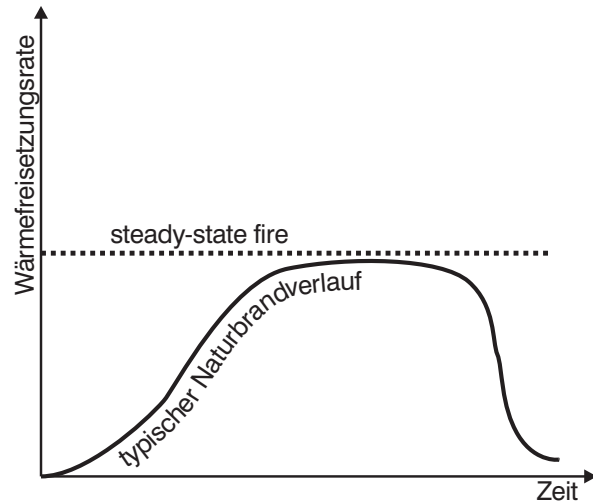


Abbildung 4: Steady-state fires

wird in der Praxis begrenzt durch z. B. die vorhandene Brandlast, die Raumgröße und durch die Brandbekämpfung.

Anwendungsbeispiele:

Bemessung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen nach einigen Richtlinien und Regeln

Ziel:

Dimensionierung von RWA, so dass eine rauchfreie Schicht über die gesamte Branddauer gewährleistet ist.

5.3.2 Zeitabhängige Brände

5.3.2.1 Bemessungsbrände aus Großversuchen

Für die Vereinbarung zeitabhängiger Brandkenngrößen in der Anfangsphase von Bemessungsbränden wird im internationalen Rahmen häufig eine mit der Branddauer exponentiell oder quadratisch wachsende Wärmefreisetzung angenommen. Es werden verschiedene Brandausbreitungsgeschwindigkeiten bzw. Brandentwicklungen klassifiziert; z. B.: langsam, mittel, schnell und sehr schnell (s. Abbildung 5).

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:

$$Q = \alpha \times t^2 \quad (6)$$

Dabei bedeuten:

Q =	Wärmefreisetzungsrate	[kW]
α =	Parameter des Zunahme-Mechanismus der Wärmefreisetzungsrate	[kW/s ²]
t =	Branddauer ohne Berücksichtigung der Inkubationsphase/Schwelbrandphase	[s]

Diese Brände charakterisieren sich je durch eine konstante spezifische Wärmefreisetzungsrate [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 Wärmefreisetzungsrate.

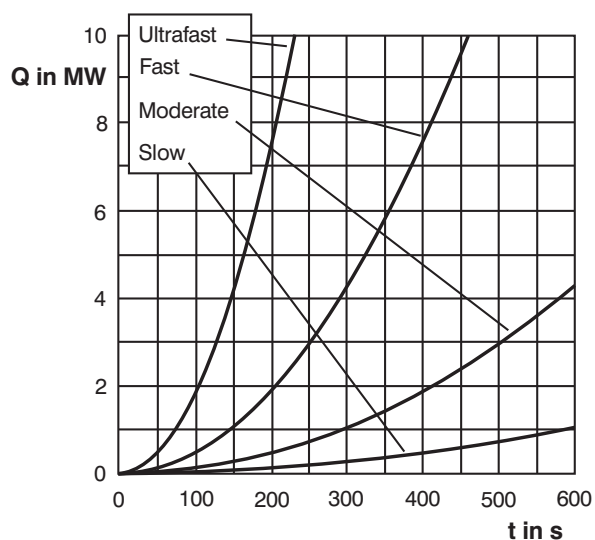


Abbildung 5: Brandentwicklung bis zum Erreichen einer maximalen Wärmefreisetzungsrate

Geschwindigkeit der Brandentwicklung	Parameter [kW/s ²]	Spezifische Branddauer [s] *
slow (langsam)	0,0029	600.0
moderate (mittel)	0,012	300.0
fast (schnell)	0,047	150.0
ultrafast (sehr schnell)	0,188	75.0

* bis zum Erreichen einer Brandleistung von 1 MW

Aus den Versuchen im Originalmaßstab zur Einstufung von Nutzungseinheiten in Brandentwicklungsklassen ergaben sich Maximalwerte für die Abbrandleistung vor einem unterschiedlichen Abklingen des Brandes. Laut Referenz [14] haben die durchgeführten Brandversuche gezeigt, dass der α -Parameter direkt proportional zur gesamten Lagerhöhe ist. Tabelle 10 enthält Empfehlungen für die Einstufung verschiedener Nutzungen; die Tabelle 11, Tabelle 12 und Tabelle 13 enthalten Werte für bestimmte brennbare Materialien.

5.4 Bemessungsbrände aus speziellen Brandversuchen

Für spezielle Brandszenarien kann es sich anbieten, die Wärmefreisetzungen mit besonderen Modellen und entsprechenden Versuchsergebnissen zu beschreiben. Für Brandszenarien, bei denen Möbel die dominierende Rolle spielen, wurden Forschungsarbeiten durchgeführt [11].

Das Hauptziel dieses CBUF Programmes (Combustion behaviour of upholstered furniture), war speziell auf die Gefährdung für Menschen ausgerichtet. Die Methodik des Programmes ist auf wissenschaftlichen und statistischen Auswertungen der Brandversuche gemäß der in den folgenden Normen beschriebenen Verfahren aufgebaut:

- ISO 5660-1 «Fire Tests - Reaction to fire. Part 1: Rate of heat release from building products (Cone calorimeter method)», first edition 1993
- ISO 9705 «Fire tests: Full scale room test for surface products», first edition 1993
- NT Fire 032 «Upholstered furniture: Burning behaviour - Full scale test», edition 2, 1991

Die publizierten Resultate des Forschungsprogrammes geben drei Rechenverfahren an, die verschiedene Abbranderscheinungen von Polstermöbeln beschreiben, wie:

- Modell I: bestehend aus mehreren einfachen Formeln, die zur Berechnung folgender Angaben führen:
 - max. Wärmefreisetzungs-Wert (kW) des betreffenden Möbelbrandes,
 - max. Verbrennungsdauer des obengenannten Möbels in einem Raum mit Abmessungen, analog zu Werten, die in der Norm ISO 9705 enthalten sind. Dieser Parameter entspricht den Bedingungen, die gefährlich für den Menschen werden,
 - total freigesetzte Wärme (kJ/MJ)
- Modelle II und III beschreiben das zeitabhängige Wachstum der Wärmefreisetzungsrate für ein Polstermöbel oder eine Matratze.

Für die 3 beschriebenen Fälle muss der Benutzer über die Ergebnisse der Verbrennungsversuche von Stoffen, die Bestandteile eines Möbels sind, verfügen (Hüllen, Schaumstoffe, Textilien). Solche Versuche müssen laut der Empfehlung gemäß ISO 5660 ausgeführt werden.

5.5 Ansätze zur Abschätzung der Sprinklerwirkung auf die Brandentwicklung

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 werden sich unterschiedliche Brandentwicklungen ereignen, über die sich die am Bau Beteiligten vor weiteren Untersuchungen einigen können (Abbildung 6).

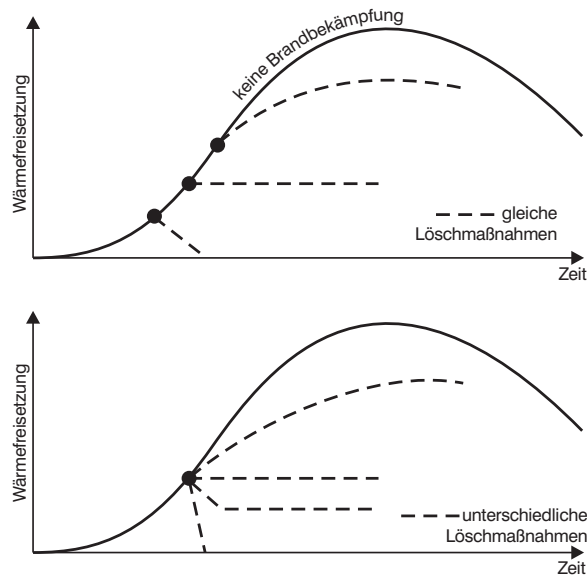


Abbildung 6: Modellcharakteristiken für den Einfluss von Löschmaßnahmen auf die Entwicklung eines Bemessungsbrandes

Sollte hierzu eine Einigung vorab nicht möglich sein, können theoretische Untersuchungen mit den Ingenieurmodellen zum Themenbereich «Brandentdeckung, Aktivierung von Maßnahmen und Brandunterdrückung» zusammen mit den Methoden zum Thema «Entstehung und Entwicklung von Bränden und von Brandprodukten» weiterhelfen.

Nachstehende Formel gibt einen in den USA entwickelten Algorithmus wieder, der die Wirkung des Sprinklerwassers auf die Wärmefreisetzung eines Brandherdes beschreibt [19,20]:

$$Q(t) = Q(t_{act}) \exp [-(t-t_{act}) / (3.0 w^{-1.85})] \quad (7)$$

(Formel gilt nur für $t \geq t_{act}$)

Dabei bedeuten:

$Q(t)$ = Wärmefreisetzung [kW]

t = Zeit nach Brandbeginn [s]

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

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

w = Spezifische Wasserbeaufschlagung der Sprinkleranlage, die niemals kleiner als 0,07 mm/s sein darf (s. Abbildung 7). [mm/s]

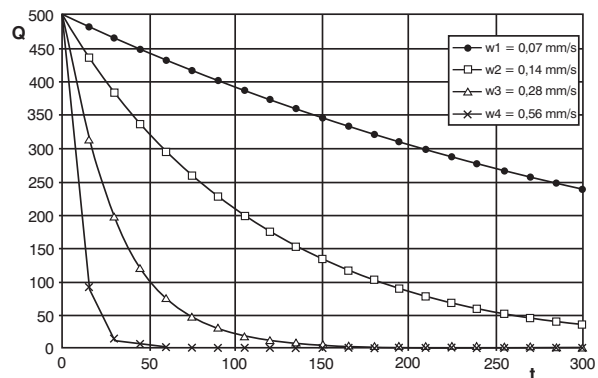


Abbildung 7: Wirkung des Sprinklerwassers auf die Wärmefreisetzungsrate eines Brandes in Funktion von Wasserbeaufschlagungswerten

Wegen der Ungewissheit der Einsatzgrenzen dieses Algorithmus sollte, nach Fleming [12], sein Einsatz auf «leichte Risiken» [21] 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 Holzrippen.

6 Literatur/Quellen

- [1] NFPA 555
Guide on Methods for Evaluating Potential for Room Flashover
NFPA, 1996, Quincy, MA (USA)
- [2] D. DRYSDALE
An Introduction to fire Dynamics
J. Wiley & Sons, 1998, Chichester (UK)
- [3] V. DUNN
Warum kann die Feuerwehr Brände in Hochhäusern nicht löschen
Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 9/1996, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart (D)
- [4] E. BAMERT
Kriterien zur Festlegung brandschutztechnischer Anforderungen aus der Sicht der Versicherer
VdS-Fachtagung «Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz», 1995
- [5] B. J. MEACHAM; R. L. P. CUSTER
Performance-Based Fire Safety Engineering: An Introduction Of Basic Concepts
J. of Fire Prot. Engineering, 7(2), 1995, pp35-54, SFPE, Bethesda, MA (USA)
- [6] J. WIESE
Schutzziele für die Festlegung brandsicherheitsstechnischer Anforderungen
23. Brandschutzseminar des VdS, 1996
- [7] Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (BauO NW)
- [8] NFPA 92 B
Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas
NFPA, 1995, Quincy MA (USA)
- [9] D. NÜSSLER
Zur Diskussion gestellt: Geschwächter Löschzug, verstärkte Löschruppe oder
«TruppSystem Aachen»?
Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 10/1996
W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart (D)
- [10] British Standard Institution (BSI)
Draft for Development «Fire Engineering in Buildings», DD240 Parts, 1,2
BSI 1997, London (UK)
- [11] CBUF: Fire safety of upholstered furniture - the final report on the CBUF research programme
Ed. B. Sundstöm, 1995, Interscience Communications, London (GB)
- [12] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
SFPE / NFPA, 1995, NFPA, Quincy MA (USA)
D. EVANS
Ceiling Jet Flows
V. BABRAUSKAS
Burning Rates
R. FLEMING
Automatic Sprinkler System Calculations
D.A. PURSER
Toxicity Assessment of Combustion Products
K. MUDAN, P. CROCE
Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires
- [13] U. SCHNEIDER
Festlegung von Brandszenarien für den Entwurf von Gebäuden und für die Risikobetrachtung
VdS-Fachtagung «Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (2)», 1995
- [14] NFPA 204
Guide for Smoke and Heat Venting
NFPA, 1998, Quincy, MA (USA)
- [15] «Fire Engineering Guidelines», Standards Australia
1996 Strathfield (AUS)
- [16] H. MORGAN, J. GARDNER
Design principles for smoke ventilation in enclosed shopping centers
Building Research Establishment Report
CI/SfB/34 (K23), 1990, Borehamwood, Herts (GB)
- [17] G. HANSELL, H. MORGAN
Design approaches for smoke control in atrium buildings
Building Research Establishment Report
CI/SfB 981 (K23), 1994, Borehamwood, Herts (GB)

- [18] J.H. KLOTE
Method of Predicting Smoke Movements in Atria with Application to Smoke Management
NISTIR 5516, U.S. Department of Commerce, 1994 (USA)
- [19] D. MADRZYKOWSKI, R. VETTORI
A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System
U.S. Department of Commerce, NISTIR 4833, 1992 (USA)
- [20] D. EVANS
Sprinkler Fire Suppression Algorithm for Hazard
NISTIR 5254, 1993, U.S. Department of Commerce, Technology Administration (USA)
- [21] NFPA 13
Standard for the Installation of Sprinkler Systems
NFPA, 1996, Quincy MA (USA)
- [22] P. BEEVER
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)
- [23] R.W. BUKOWSKI
How to Evaluate Alternative Designs Based on Fire Modeling
NFPA Journal, March/April 1995, NFPA, Quincy, MA (USA)
- [24] W. WALTON, E. BUDNICK
Quick Response Sprinkler in Office Configurations: Fire Test Results
U.S. Department of Commerce, NBSIR 88-3695, 1988 (USA)
- [25] D. MADRZYKOWSKI
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)
- [26] G.D. LOUGHEED 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)
- [27] J. MANGS, O. KESKI-RAHKONEN
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)
- [28] M. SHIPP, M. SPEARPOINT
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)
- [29] W.D. WALTON
Quick Response Sprinklers in Chemical Laboratories: Fire Test Results
U.S. Department of Commerce, NISTIR 89-4200, 1989 (USA)
- [30] B. HÄGGLUND, U. WICKSTRÖM
Smoke Control in Hospitals - A Numerical Study
Fire Safety Journal, Vol. 16, No. 1, 1990, Elsevier Science, Barking, Essex (GB)
- [31] NFPA 101 A
Guide on Alternative Approaches to Life Safety
NFPA, 1995, Quincy, MA (USA)
- [32] S.E. DEAL
Technical Reference Guide for FPEtool vers. 3.2
U.S. Department of Commerce, NISTIR 5486, 1994 (USA)
- [33] H.E. NELSON
FPEtool: Fire Protection Engineering Tools for Hazard Estimation
U.S. Department of Commerce, NISTIR 4380, 1991 (USA)
- [34] H. RÖNN, CH. HILDENBRAND
Brandrisiko von Getränkelagern
VFDB Zeitschrift Forschung und Technik, 1/94, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart (D)
- [35] D. BREIN
Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 1: Literaturlauswertung
Forschungsbericht Nr. 55, 1985, Universität Karlsruhe (TH)
- [36] K.-H. STAHL
VdS-Brandversuche mit Kunststoff-Lagerbehältern
VFDB Zeitschrift Forschung und Technik, 1/94, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart (D)

7 Anhang

Tabelle 7: Beispiele für vereinbarte zeitunabhängige Bemessungsbrände (Abbrandleistung)			
Nutzung [Quelle]	Brandfläche [m²]	Brandumfang [m]	Max. Abbrandleistung [MW]
Einkaufszentrum: Brandherd unter Sprinklerkontrolle [16]	9,0	12,0	5,0
Warenannahme im Einkaufszentrum: Brand von einem Sattelschleppanhänger [16]	-	15,0	7,0
Parkhaus unterirdisch / gedeckt / geschlossen: Pkw - Brand [16,17]	-	12,0	2,5
Büros mit Sprinkler [17]	16,0	14,0	1,0
Büros ohne Sprinkler [17]	47,0	24,0	6,0
Hotelzimmer von 20,0 m ² (Vollbrand des Inhaltes) [17]	-	-	1,0
Hotelzimmer mit Sprinkler (Feuer auf ein Bett begrenzt), [17]	-	6,0	0,5
Brand einer Latexschaum-Matratze: Wärmefreisetzungsrate gemessen an der Tür des Brandraumes [8,14]	-	-	1,27
Brand eines Wohnraumes: Wärmefreisetzungsrate gemessen an der Tür des Brandraumes nach dem Feuer-sprung [8,14]	-	-	4,2 - 8,4
Unterste Ebene eines Innenhofes (Mitte des Hofes): 4 Polstersessel [17]	-	6,0	2,0
Unterste Ebene eines Innenhofes (Mitte des Hofes) mit minimaler Brandlast, z. B. für Verpackungen, Christbäume und Möbel [18]	8,9	-	2,0
Unterste Ebene eines Innenhofes (Mitte des Hofes) mit planmäßig vorhandener Brandlast, z. B. für Holz, Möbel und andere brennbare Stoffe / Waren / Gegenstände [18]	10,0	-	5,0
Großbrand im Innenhof für oben genannte Brandlast [18]	50,0	-	25,0

Tabelle 8: Beispiele für vereinbarte zeitunabhängige Bemessungsbrände (spezifische Wärmefreisetzungsrate)	
Nutzung / Lagerungsart der brennbaren Waren / Gegenstände	Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m²]
Büros mit Sprinkler [17]	115.0
Büros ohne Sprinkler [17]	185.0 [17]; 225.0 [18]; 227.0 [8]; 250.0 [10], 290.0 [8]
Unterste Ebene eines Innenhofes (Mitte des Hofes) für unbekannte Nutzung [17]	500.0
Verkaufsfläche in einem Einkaufszentrum [8,10,18,22]	500.0
Wohnung [18]	500.0
Hotelzimmer [8]	249.0
Industriegebäude [8]	260.0
Holz / PMMA (waagrecht) - obere Fläche des Stapels [8,14]	715.0
PS fest (waagrecht) - obere Fläche des Stapels [8,14]	1362.0
PP fest (waagrecht) - obere Fläche des Stapels [8,14]	795.0
PMMA = Polymethylmethacrylat; PS = Polystyrol; PP = Polypropylen	

Stoff / Lagerungsart	Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m Breite]
Holz oder PMMA (senkrecht): Höhe: 0.61m 1.83m 2.44m 3.66m	103.8 243.13 622.6 1037.7
PS fest (senkrecht): Höhe: 0.61m 1.83m 2.44m 3.66m	217.9 449.7 1383.6 2352.1
PP fest (senkrecht): Höhe: 0.61m 1.83m 2.44m 3.66m	217.9 345.9 968.5 1625.7

PMMA = Polymethylmethacrylat; PS = Polystyrol; PP = Polypropylen

Nutzung	Geschwindigkeit der Brandentwicklung
Wohnungen [10]	mittel
Büros [10]	mittel
Warenhaus - Verkauf [10,22]	schnell
Hotel - Rezeption [10]	mittel
Hotel - Zimmer [10]	mittel
Gemäldegalerie [10]	langsam
Jegliche Nutzung ohne leichtbrennbare Stoffe [23]	mittel

Nutzung	Geschwindigkeit der Brandentwicklung (s. Tabelle 6)	Max. erreichte Abbrandleistung [MW]
PC-Arbeitsplatz; massive Möbel (Holzspanplatten); freie Verbrennung [8,24]	langsam	1,8
PC-Arbeitsplatz; massive Möbel (Holzspanplatten); Versuch in einem Raum mit ISO 9705-mäßigen Abmessungen [8,24]	langsam	2,5
PC-Arbeitsplatz in einem Großraumbüro; massive Möbel (Holzspanplatten) und mit brennbaren Wandschirmen unterteilt [25]	schnell	6,8
Büro; Papier - Dokumentation auf Metallregalen; freie Verbrennung [24]	bis 200 s - mittel und nach 200 s - schnell	1,6
Büroeinheit; massive Möbel (Holzspanplatten); Versuch in einem Raum mit ISO 9705-mäßigen Abmessungen [24]	langsam	2,25
Verschiedene Büro-Gegenstände (Ausrüstung von Arbeitsplätzen); freie Verbrennung [19]	im Durchschnitt langsam	-
Mobile Metallregale mit Archivdokumenten [26]	schnell	-
Pkw in einem öffentlichen Parkhaus [27]	langsam	2,0
Pkw in einer kleinen, gut belüfteten Garage [28]	schnell	8,5
Chemielabor [29]	sehr schnell	2,0
Diverse Ausstellungen [8]	langsam	-
Normales Bett in einem schwedischen Spital [30]	langsam	0,3

Tabelle 12: Beispiele zur Brandentwicklung von Möbeln (Ergebnisse der Brandversuche im Maßstab 1:1 [8,12 - Babrauskas, 14,31,32,33])		
Aufbau des getesteten Möbels	Geschwindigkeit der Brandentwicklung	Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m²]
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
keepKleiderschrank aus dünnem (3,2mm Dicke), lamellenverleimtem Holz (1,3x0,61x1,8m Höhe)	sehr schnell	6.810,0
Kleiderschrank aus dünnem (3,2mm Dicke), lamellenverleimtem Holz (1,3x0,61x1,8m Höhe) mit flammhemmendem Anstrich	sehr schnell	3.860,0
Kleiderschrank aus Holzspanplatten (12,7mm Dicke); (1,3x0,61x1,8m Höhe)	sehr schnell	4.704,0
Kleiderschrank mit Schubladen aus Holzspanplatten (19,0mm Dicke); (1,3x0,61x1,8m 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
* Möbelgewichte		
schwere Möbel:	spezifische Last größer als 73.0 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 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 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 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, der unter Hitzeeinwirkung schmilzt.	
Typ B:	Möbel bestehend aus: normalem oder leicht flammhemmend behandeltem Schaum, bedeckt entweder mit Nylonhülle oder mit Kunststoff, der 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, die 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 50.0 % erhöht.		

Tabelle 13: Aus Versuchen im Maßstab 1:1 ermittelte Angaben zur Brandentwicklung für ausgewählte Lager				
Waren	Lagerungsart	Lagerungshöhe [m]	Geschwindigkeit der Brandentwicklung	Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate [kW/m ²]
Holzpaletten (Abmessungen: 1.2 x 1.2 x 0.14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6.0-12.0%) [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	0,5	mittel - schnell	1.248,5
Holzpaletten (Abmessungen: 1.2 x 1.2 x 0.14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6.0-12.0%) [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	1,5	schnell	3.745,5
Holzpaletten (Abmessungen: 1.2 x 1.2 x 0.14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6.0-12.0%) [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	3,0	schnell	6.810,0
Holzpaletten (Abmessungen: 1.2 x 1.2 x 0.14 m; Feuchtigkeitsgrad: 6.0-12.0%) [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,9	schnell	10.215,0
gefüllte Postsäcke [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	1,5	schnell	397,3
unterteilte Leerkartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	sehr schnell	2.270,0
Papierrollen [8,14]	senkrecht gestapelt	6,1	sehr schnell	-
Bekleidung aus Baumwolle, PE, PE/Baumwolle, Acryl/Nylon/PE [8,14]	Regale	3,7	sehr schnell	-
Leerkartons auf Holzpaletten [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6 - 9,1	mittel - schnell	-
Papierartikel in Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	6,1	langsam - mittel	-
gefüllte Briefboxen auf Rollwagen [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	1,5	schnell	8.512,5
PE-Kehrichteimer in Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	sehr schnell	2.837,5
GFK-Duschkabine in Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	sehr schnell	1.298,5
PE-Flaschen in unterteilten Kartons [8,14]	Regale	4,6	sehr schnell	6.242,5
PE-Flaschen in unterteilten Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	sehr schnell	1.929,5
PE-Paletten [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	0,9	schnell	-
PE-Paletten [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	1,8 - 2,4	sehr schnell	-
PU-Hartschaum Isolationsplatten [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	sehr schnell	1.929,5
PS-Becher in unterteilten Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	sehr schnell	13.620,0
PS-Zuber in Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,3	schnell	5.107,5
PS-Spielzeugteile in Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	schnell	2.043,0
PS-Hartschaum Isolationsplatten [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,3	sehr schnell	3.291,5
PVC-Flaschen in verteilten Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	sehr schnell	3.405,0
PP-Kübel in unterteilten Kartons [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,6	sehr schnell	4.426,5
PP oder PE Folienrollen [8,14]	gestapelt/ Blocklagerung	4,3	sehr schnell	3.972,5
PE-Kisten mit leeren PET/Glasflaschen [34,35]	gestapelt/ Blocklagerung	?	schnell	-
PE-Kisten mit gefüllten (Bier/alkoholfreie Getränke) PET/Glasflaschen [34,35]	gestapelt/ Blocklagerung	?	langsam	-
Kleinladungsträger (KLT) aus - PE, - PP mit Graphit, - HDPE [36]	gestapelt/ Blocklagerung	2,95	schnell - sehr schnell	-
Normal brennbare Gegenstände [14]	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 Lagerungshöhe.				

