

Seminar:

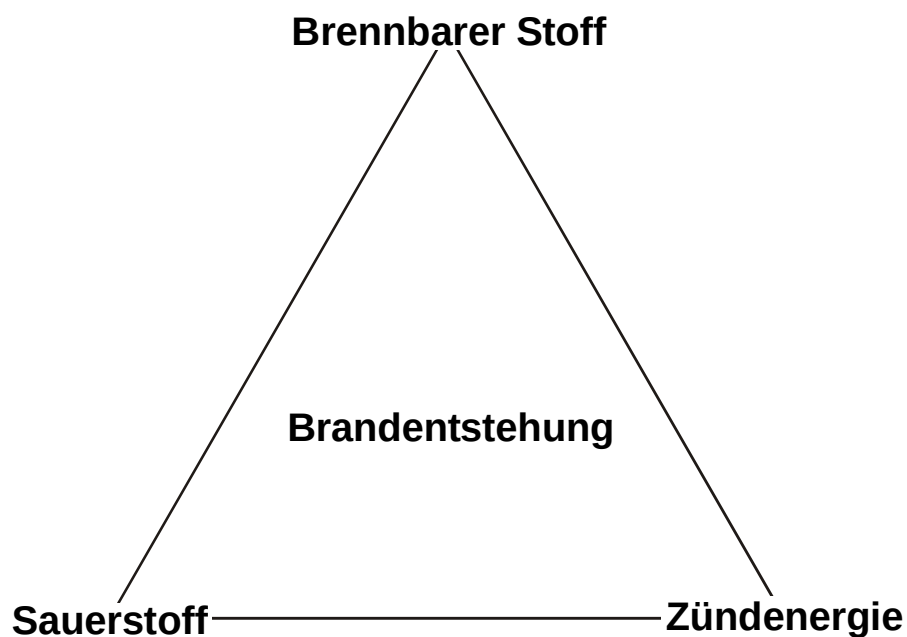
Baulicher Brandschutz

Brandschutz 2000 – Ingenieurmethoden im Brandschutz

Lehrgang Nr.: 25223/94.135

Festlegung von Schutzzielen und Brandszenarien für den Brandschutzentwurf

Dozent o. Univ. Prof. DDr. Ulrich Schneider



TU Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz
Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit, ABG, Bruchsal
VIB, Verein zur Förderung von Ingenieurmethoden im Brandschutz
e.V., Holzminden

INHALTSVERZEICHNIS

<u>1</u>	<u>EINLEITUNG – BRANDSCHUTZ 2000</u>	<u>3</u>
<u>2</u>	<u>SCHUTZZIELE IM BRANDSCHUTZENTWURF</u>	<u>4</u>
<u>2.1</u>	<u>ALLGEMEINES SCHUTZZIEL IM BAURECHT</u>	<u>4</u>
<u>2.2</u>	<u>SCHUTZZIELORIENTIERTE BRANDSCHUTZBEMESSUNGEN</u>	<u>5</u>
<u>2.3</u>	<u>REALISIERUNG DER SCHUTZZIELORIENTIERTEN BRANDSCHUTZBEMESSUNG</u>	<u>6</u>
<u>2.4</u>	<u>SICHERHEITSASPEKTE BEI DER SCHUTZZIELORIENTIERTEN BRANDSCHUTZBEMESSUNG</u>	<u>9</u>
<u>3</u>	<u>DER BRAND</u>	<u>10</u>
<u>3.1</u>	<u>EINLEITUNG</u>	<u>10</u>
<u>3.2</u>	<u>PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE VORGÄNGE BEIM BRAND</u>	<u>11</u>
<u>3.2.1</u>	<u>DER VERBRENNUNGSVORGANG</u>	<u>11</u>
<u>3.2.2</u>	<u>GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNGSPROZESSE</u>	<u>12</u>
<u>3.3</u>	<u>ABLAUF EINES SCHADENFEUERS</u>	<u>18</u>
<u>4</u>	<u>DESIGN FIRES UND BEMESSUNGSBRANDSZENARIEN</u>	<u>19</u>
<u>4.1</u>	<u>EINLEITUNG</u>	<u>19</u>
<u>4.2</u>	<u>ENTWICKLUNG UND AUSWAHL VON BEMESSUNGSBRANDSZENARIEN FÜR DIE BRANDSCHUTZANALYSE</u>	<u>21</u>
<u>4.2.1</u>	<u>SCHRITT 1: ART DES BRANDES</u>	<u>21</u>
<u>4.2.2</u>	<u>SCHRITT 2: BRANDBEREICH</u>	<u>21</u>

<u>4.2.3</u>	<u>SCHRITT 3: POTENTIELLE BRANDGEFAHREN(-KATASTROPHEN)</u>	22
<u>4.2.4</u>	<u>SCHRITT 4: TECHNISCHE SYSTEME DIE EINEN EINFLUSS AUF DIE BRANDSZENARIOUM HABEN</u>	22
<u>4.2.5</u>	<u>SCHRITT 5: REAKTION DER PERSONEN (IM GEBÄUDE)</u>	22
<u>4.2.6</u>	<u>SCHRITT 6: EREIGNISBAUM</u>	23
<u>4.2.7</u>	<u>SCHRITT 7: WAHRSCHEINLICHKEITEN</u>	23
<u>4.2.8</u>	<u>SCHRITT 8: ABSCHÄTZUNG DER FOLGEN</u>	23
<u>4.2.9</u>	<u>SCHRITT 9: RISIKOBEWERTUNG</u>	23
<u>4.2.10</u>	<u>SCHRITT 10: AUSWAHL DER RELEVANTEN BEMESSUNGSBRANDSZENARIEN UND DOKUMENTATION</u>	23
<u>4.3</u>	<u>DESIGN FIRES</u>	24
<u>4.3.1</u>	<u>AUFGABE VON DESIGN FIRES</u>	24
<u>4.3.2</u>	<u>SYSTEMATISIERUNG VON DESIGN FIRES</u>	24
<u>4.3.3</u>	<u>DESIGN FIRE BERUHEND AUF NORMATIVEN TEMPERATUR-ZEIT-KURVEN</u>	26
<u>4.3.3.1</u>	<u>Einheits-Temperaturkurve (ISO 834, Teil 1)</u>	27
<u>4.3.3.2</u>	<u>Harmonisierte Hydrokarbon-Kurve</u>	27
<u>4.3.3.3</u>	<u>Schwelfeuerkurve</u>	27
<u>4.3.3.4</u>	<u>Externe Brandkurve</u>	28
<u>4.3.3.5</u>	<u>RABT Kurve (Tunnelbrandkurve)</u>	28
<u>4.3.3.6</u>	<u>Anwendung der nominellen Temperatur-Zeit-Kurve im brandschutztechnischen Design</u>	28
<u>4.3.4</u>	<u>DESIGN FIRE BERUHEND AUF BRANDLEISTUNGSKURVEN</u>	30
<u>4.3.4.1</u>	<u>Konstante Brandleistung</u>	30
<u>4.3.4.2</u>	<u>Zeitlich abhängige Brandleistungs-Kurven (Heat-Release-Curves)</u>	36
<u>4.3.5</u>	<u>BRANDLEISTUNGS - KURVEN AUS EXPERIMENTELLEN DATEN</u>	39
<u>4.3.6</u>	<u>PARAMETRISCHE DESIGN FIRES</u>	43
<u>4.3.6.1</u>	<u>Parametrische Temperaturzeitkurve nach ENV 1991-2-2, Anhang B</u>	43
<u>5</u>	<u>ENTWICKLUNG VON DESIGN FIRES</u>	46
<u>5.1</u>	<u>GRUNDLAGEN DER BERECHNUNG DES ABLAUFES VON REALEN BRÄNDEN</u>	47
<u>5.2</u>	<u>ERMITTLUNG EINES DESIGN FIRES AUS EINER GEgebenEN BRANDLASTAUFSSTELLUNG</u>	51
<u>5.3</u>	<u>PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN</u>	55
<u>6</u>	<u>LITERATUR</u>	57

1 Einleitung – Brandschutz 2000

Die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte im Bauwesen lassen erkennen, dass neben den Standsicherheitsüberlegungen zunehmend andere Bereiche der Bautechnik wie Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz, Brandschutz und Umweltschutz bei der Planung und Errichtung an Bedeutung gewinnen, d. h. bei dem Entwurf von Bauwerken und der Bemessung von Bauteilen sind im wesentlichen folgende Schutzmaßnahmen zu beachten [1]:

- Standsicherheit,
- Wärmeschutz,
- Feuchteschutz,
- Schallschutz,
- Brandschutz,
- Umweltschutz.

Im Hinblick auf die spätere Nutzung und den Betrieb großer Gebäude ist neben der Standsicherheit und dem Wärmeschutz insbesondere der Brandschutz von wesentlicher Bedeutung.

Hinkünftig sollte der Brandschutz auch aufgrund der ständig anwachsenden Brandgefahren durch die Zunahme der brennbaren Stoffe, hinsichtlich der Vielfältigkeit der Brandursachen und auch in bezug auf die Größe der Brände bei der Planung vermehrt Beachtung finden. Die wirtschaftliche Entwicklung der letzten Jahre hat diesbezüglich auch zu einer vermehrten Beachtung auf volkswirtschaftliche Belange geführt, so dass auch der Einfluss der Brandschäden auf die Volkswirtschaft, u. a. im Interesse der Arbeitsplatzsicherung, einen beachtenswerten Stellenwert besitzt.

Um den Brandschutz kostengünstig und der Nutzung entsprechend auszuführen sind neue Ansätze und Betrachtungen notwendig. In einer ganzheitlichen Betrachtung des Brandschutzes im Rahmen des Gebäudedesign besteht die Notwendigkeit Schutzziele und entsprechende Bemessungsbrandszenarien zu definieren und durch geeignete Maßnahmen die Erfüllung der Schutzziele zu zeigen.

2 Schutzziele im Brandschutzentwurf

2.1 Allgemeines Schutzziel im Baurecht

Die deutschen Brandschutzvorschriften im Bezug auf bauliche Brandschutzmaßnahmen sind vergleichsweise streng, wobei durchaus vorgesehen ist, Erleichterungen zu gestatten, wenn die Schutzziele auch auf andere Weise erreicht werden können. Die Nachweisführung dazu ist allerdings i. A. nur auf rechnerischem Weg möglich, wobei aufwendige Rechenprogramme erforderlich sind. Die Verbesserung der Akzeptanz dieser Programme durch ein Qualitätssicherungssystem würde dazu führen, dass die Genehmigungsphasen für Bauvorhaben deutlich kürzer werden können und darüber hinaus Baukosten gesenkt werden können, weil auf kostspielige bauliche und anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen, welche nur im Hinblick auf Vorsorgeüberlegungen vorgenommen werden, verzichtet werden kann, wenn die erforderlichen Brandschutzmaßnahmen optimiert werden.

In den Bauordnungen der einzelnen Bundesländer werden die grundlegenden Schutzziele zum Brandschutz definiert. In § 17 (1) der Musterbauordnung (MBO) / L-1.9 / wird beispielsweise ausgeführt:

Bauliche Anlagen müssen so beschaffen 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.

Der Entstehung von Bränden wird i. A. vorgebeugt durch

- vorgesehene nutzungsspezifische Maßnahmen,
- Regelungen in der Brandschutzordnung.

Der Ausbreitung von Feuer und Rauch wird u. a. vorgebeugt durch:

- feuerbeständige bzw. feuerhemmende Abtrennungen von Nutzungseinheiten bzw. durch die Bildung von Brandabschnitten oder Brandbekämpfungsabschnitten,
- Anordnung insbesondere Abstände der brennbaren Stoffe untereinander,
- die Verwendung von nichtbrennbaren Baustoffen,
- Maßnahmen zur Brandfrüherkennung und Brandbekämpfung,
- Gebäudeabstände.

Wirksame Löscharbeiten werden i. d. R. ermöglicht durch:

- Maßnahmen zur Brandfrüherkennung und Brandbekämpfung,
- feuerwiderstandsfähige Bauteile,
- Maßnahmen zur Sicherstellung der manuellen Brandbekämpfung u. a.,
 - Anordnung von Rauchabzugsanlagen,
 - Zugangsmöglichkeiten,
 - Löschwasserversorgung,
 - Erstellung von Feuerwehreinsatzplänen.

Die Rettung von Menschen und Tieren wird sichergestellt durch die Einhaltung von zulässigen Rettungsweglängen, die im Normalfall unter 35 m liegen sollen. In Einzelfällen bzw. für einige Sonderbauten werden Erleichterungen gestattet bzw. schärfere Anforderungen gestellt. Über die maximalen Weglängen hinaus werden z. B. in den Bauordnungen oder in Verordnungen und Richtlinien für besondere Nutzungen Festlegungen getroffen, wie die Rettungswege insbesondere Flure und Treppenräume untereinander bzw. zu Nutzräumen abgetrennt werden müssen.

Alle bisher genannten Maßnahmen werden nach der derzeitigen Praxis teilweise pauschal gefordert. Es werden dabei immer konstruktive Lösungen angegeben. Diese wurden i. w. auf der Basis der vorliegenden Erfahrungen bei Bränden in vergleichbaren Nutzungen festgelegt. Die Menge der in den Gebäuden vorhandenen brennbaren Stoffe sowie die zeitlichen Abläufe der zu erwartenden Brände werden dabei im Einzelfall nicht berücksichtigt. In diesem Fall kann auf kein Brandszenarium zurückgegriffen werden, mit dem die Gleichwertigkeit von vorgesehenen Ersatzmaßnahmen beurteilt werden kann. Nur im Industriebau werden die Anforderungen an die erforderliche Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen und die Einordnung in Brandschutzklassen in Abhängigkeit von dem zu erwartenden Brandszenarium festgelegt. Unter Verwendung des der Bemessung im Industriebau zugrundeliegenden Brandszenariums (siehe Erläuterungen zu DIN 18230, Ausgabe 04/98) können gleichwertige Lösungen festgelegt werden. Für die Weiterentwicklung des Brandschutzingenieurwesens sind daher schutzzielorientierte Verfahren erforderlich, bzw. müssen die Anforderungen schutzzielorientiert definiert werden.

2.2 Schutzzielorientierte Brandschutzbemessungen

Eine schutzzielorientierte Brandschutzbemessung ist wie im folgenden beschrieben aufgebaut. Als erster Schritt werden die Schutzziele des Brandschutzdesigns festgelegt. Solche Schutzziele sind die grundsätzlichen Forderungen der Bauordnungen und ggf. zusätzliche darüber hinausgehende Anforderungen. Die Anforderungen können beispielsweise sein :

- Schutz der Personen im betrachteten Bauwerk im Brandfall (Flucht und Rettung).
- Möglichkeit der Feuerwehr zur Brandbekämpfung und Rettung von Personen.
- Schutz der Umwelt, als umfassender Begriff, beispielsweise Sachschutz der umgebenden Bauwerke (Verhinderung der Brandausbreitung) oder Schutz der Umgebung vor der Freisetzung gefährlicher Stoffe (giftige Gase oder Löschwasser) im Brandfall.
- Schutz vor Verlust des Gebäudes und der in den Gebäuden untergebrachten Werte (Sachschutz).

Zum Erreichen dieser Schutzziele müssen geeignete Maßnahmen vorgesehen werden. Solche Maßnahmen können beispielsweise sein:

- Bauteil- und Baustoffauswahl (z. B. Baustoffe und Bauteile mit erhöhten Feuerwiderstand),
- bauliche Maßnahmen (z.B. zusätzliche Flucht- und Rettungswege),
- Maßnahmen für die manuelle Brandbekämpfung,
- Löschmaßnahmen (Sprinklerung),
- Detektionssysteme (Brandmeldeanlagen),
- Rauch- und Wärmeabzugsanlagen.

Die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen ist nachzuweisen u. a. durch:

- Technische Regelwerke
- Experimente (bei gesicherter Übertragbarkeit)
- Berechnungsmethoden wie
 - genormten Berechnungsverfahren (z. B. DIN 18230),
 - analytische Berechnungsverfahren (Plumeformeln usw.),
 - Brandsimulationsberechnungen (Wärmebilanzrechnungen),
- Risikoanalysen.

Hieraus wird deutlich, dass sich das Ergebnis einer Bemessung auf der Basis eines schutzzielorientierten Verfahrens auf die gleichen Maßnahmen bezieht, die bisher aufgrund bauaufsichtlicher Regelungen pauschal, d. h. ohne Rücksicht auf den Einzelfall festgelegt werden.

Dass die Schutzziele erreicht werden, wird dabei durch Berechnungen mit Brandsimulationsmodellen nachgewiesen, wobei ein definiertes Brandszenarium zugrundegelegt wird.

2.3 Realisierung der schutzzielorientierten Brandschutzbemessung

Die Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit von Brandsimulationsmodellen spielt bei der Bewertung von schutzzielorientierten Verfahren eine zentrale Rolle. Die Nachweisverfahren mit Brandsimulationsmodellen basieren in der Regel auf vereinfachten thermodynamischen Modellen, welche die Realität angenähert wiedergeben.

Bei der Einhaltung von allgemeinen Regelungen für die Ausbildung von Abtrennungen zwischen Nutzungseinheiten und von Rettungswegen in Gesetzen, Vorschriften und Richtlinien ist davon auszugehen, dass die grundlegenden Schutzziele der Bauordnungen erfüllt sind (sogenannte bewährte Bauweisen). Besondere Nachweise sind erforderlich, wenn von diesen Regelungen abgewichen werden soll. Solche Nachweise sind z. B. erforderlich für Bauten besonderer Art und Nutzung.

Diese Nachweise beziehen sich auf Anforderungen an die Standsicherheit, an die Gewährleistung des Raumabschlusses durch Bauteile und auch an die Gestaltung und Ausbildung von Rettungswegen. Bei der Beurteilung der Ausbildung von Rettungswegen zur Fluch- und Rettung sowie zur Brandbekämpfung spielt die ausreichende Rauchfreihaltung eine zentrale Rolle. Im folgenden wird beispielhaft vergleichend jeweils die Methode nach herkömmlicher Beurteilung und nach dem schutzzielorientierten Verfahren dargestellt.

Für die Flucht- und Rettung in Gebäuden ist beispielsweise die Rauchfreihaltung von primärer Bedeutung. Durch die Anordnung von Öffnungsflächen in Decken, Dächern und Wänden oder von maschinellen Entrauchungsanlagen, die im Brandfall automatisch bei Brand- bzw. Raucheinwirkung oder von Hand geöffnet werden, können die Rauchgase aus dem Gebäude abgeführt werden. Durch eine gezielte und ausreichende Rauchabfuhr wird u. a.

- eine raucharme Schicht sichergestellt,
- der Vollbrand verhindert bzw. die Zeitspanne bis zum Eintreten des Vollbrandes vergrößert.

Bei Öffnungsflächen mit natürlicher Ventilation wird die Wirksamkeit der Rauchabfuhr entscheidend durch die Druck- und Temperaturverteilung im Gebäude bestimmt. Die Öffnungsflächen sind im Verlauf des Brandes je nach Anordnung (oben oder unten) Zuluft- und/oder Abluftöffnungen. Mit zunehmender Rauchsichtdicke und Rauchgastemperatur nimmt der abgeführte Rauchgasvolumenstrom ebenfalls zu. Dies ist bei maschinellen Entrauchungsanlagen nicht der Fall. Diese Anlagen fördern, abgesehen von einer im Brandfall üblicherweise wenig geänderten Absolutdruckänderung immer den gleichen Volumenstrom. Das bedeutet, dass mit zunehmender Temperatur der abgeführte Massenstrom deutlich geringer wird.

Wenn die Anordnung von Öffnungen mit natürlicher Ventilation möglich ist, d. h. bei eingeschossigen Gebäuden oder im Dachgeschoss von mehrgeschossigen Gebäuden, werden daher bei diesen Gebäuden normalerweise im Dach RWA-Anlagen mit einer erforderlichen aerodynamischen Öffnungsfläche installiert, die auf der Basis eines Näherungsverfahrens, z. B. nach DIN 18232 oder nach VdS Form 2098 bemessen werden können.

Die Anordnung von Öffnungen mit natürlicher Ventilation in den Wänden ist bei mehrgeschossigen Gebäuden mit einer vergleichsweise geringen Grundfläche und großen Geschosshöhe nur mit Einschränkungen möglich. Das Näherungsverfahren nach DIN 18232 ist hier allerdings nicht anwendbar, so dass daher besondere Nachweise zur Wirksamkeit erforderlich sind.

In allen anderen Fällen oder wenn die betriebliche Nutzung den Einbau von Öffnungen mit natürlicher Ventilation nicht zulässt, kann i. d. R. auf die Installation von mechanischen Rauchabzugsanlagen nicht verzichtet werden. Davon kann evtl. abgewichen werden, wenn z. B.

- eine automatische Löschanlage vorhanden ist oder
- aufgrund der baulichen Gegebenheiten und der Nutzung gefährliche Verrauchungen nicht auftreten können

und die grundlegenden Schutzziele der Bauordnung somit erreicht werden.

Eine ausreichende Freihaltung von Rettungswegen bzw. von Nutzräumen kann auch nach einer schutzzielorientierten Methode beurteilt werden. Mit dieser Methode kann die Wirkungsweise von Einrichtungen zur Abfuhr von Wärme- und Rauch im Brandfall, insbesondere die Einhaltung bzw. Sicherstellung von raucharmen Schichten für die zur Flucht und Rettung bzw. zur Brandbekämpfung relevanten Zeiträume beurteilt werden. Zur ausreichenden Einhaltung der grundlegenden Schutzziele der Bauordnung wird vorgeschlagen, dass durch die Wärmebilanzrechnungen nachgewiesen wird, dass z. B. die

- Rettungswege bzw. zur Rettung und Brandbekämpfung benötigte Verkehrswege nicht verrauchen, wobei die „Rauchfreiheit“ als gegeben vorausgesetzt wird, wenn über dem Boden, d. h. in der raucharmen Schicht für eine Dauer von mindestens 30 Minuten
 - eine CO₂-Konzentration von < 0,5%,
 - die Sichtweiten mindestens der Rettungsweglänge entsprechen,
 - die Temperaturen bei < 40°C liegen
 - und die Minstdicke der raucharmen Schicht bei > 3 m liegt,
- Umgebung des Brandherdes für Feuerwehr begehbar bleibt, wobei die „Begehbarkeit“ als gegeben vorausgesetzt wird, wenn über dem Boden, d. h. in der raucharmen Schicht für eine Dauer von mindestens 60 Minuten z. B. die
 - Temperaturen bei < 100°C liegen,
 - Sichtweite mindestens 10 bis 20 m beträgt,
 - Minstdicke der raucharmen Schicht bei > 2 m liegt,
- Standsicherheit der Tragkonstruktion mindestens für die Dauer der manuellen Brandbekämpfung gewährleistet ist.

Für Gebäude mit besonderen Nutzungen (z. B. bei größeren Räumungs- oder Brandbekämpfungszeiten) sind höhere Anforderungen, insbesondere hinsichtlich der nachzuweisenden Zeiträume erforderlich. Für eine allgemeine Anwendung der Ingenieurverfahren müssen die Schutzziele in jedem Einzelfall festgelegt werden, d. h. die Schutzziele müssen mit den Beteiligten, insbesondere mit den Nutzern und Behörden konsensual abgestimmt werden.

Bezüglich des Schutzzieles Personenrettung sind im Entwurf der Euronorm pr EN 12 101-5 folgende Empfehlungen zu finden [27].

Tabelle 2.1 : Raucharme Schichthöhe über Rettungswegen nach CEN [27]

Höhe der raucharmen Schicht in m	Gebäudeart
3,0	öffentliche Gebäude, Einkaufszentren, Messehallen
2,5 m	nichtöffentliche Gebäude, Büros, Gefängnisse
2,5 m oder 0,8 * H	Großgaragen

In [2] wird zusätzlich verlangt, dass die Werte nach

Tabelle 2.1 um 0,5 m zu erhöhen sind, wenn die berechneten Rauchsichttemperaturen um mehr als 100 °C über der Umgebungstemperatur liegen.

Für Warenhäuser wird in [27] gefordert, dass die Untergrenze der Rauchsicht mindestens 0,5 m über der Spitze der gestapelten Waren liegen sollte.

Es ist beachtenswert, dass die hier genannten Schutzziele sehr gut mit den Schutzziele, welche u. a. bei der Festlegung der Rettungsweglängen in Industriegebäuden nach DIN 18 230-1 und der Industriebau-Richtlinie als Grundlage gedient haben, übereinstimmen. Auch in dem Forschungsvorhaben nach [28] wurden entsprechende Schutzziele formuliert, wobei in diesem Fall, neben der Rauchsichthöhe auch die Zeitdauer für die Rauchfreiheit als Schutzzielkriterium herangezogen wurde.

Es ist jedoch auch möglich, eine Rauchentlüftungsanlage so zu entwerfen, um nur den Einsatzkräften einen Bereich mit reiner Luft unterhalb der aufwärtsstrebenden Rauchsicht zu verschaffen, so dass diese einfacher und schneller das Feuer finden und bekämpfen können. Aufgrund des Trainings und der Spezialausrüstung der Feuerwehrmänner, ist es zumutbar, dabei schlimmere Bedingungen zu akzeptieren, als sie für andere ungeschützte und ungeübte Personen erforderlich sind; z. B. geringere raucharme Schichtdicken oder kürzere Sichtweiten.

Für den Personenschutz und eine wirksame Brandbekämpfung durch die Feuerwehr können für eine ingenieurmäßige Bewertung zum Beispiel auch folgende Kriterien maßgebend sein (s. Tabelle 2.2):

Tabelle 2.2 : Beispiele für rechnerische Grenzwerte für Überlebensbedingungen aus der Literatur [1]

Kriterium	Grenzwert	Grenzwert mit Sicherheitsfaktor*
Wärmestrahlung auf den Boden außerhalb des Brandentstehungsraumes	$< 20 \text{ [kW/m}^2\text{]}$	$< 10 \text{ [kW/m}^2\text{]}$
Sauerstoff – Konzentration	$> 12 \text{ Vol.-%}$	$> 14 \text{ Vol.-%}$
CO ₂ – Konzentration	$< 6 \text{ Vol.-%}$	$< 5 \text{ Vol.-%}$
CO – Konzentration	$< 1400 \text{ ppm}$	$< 700 \text{ ppm}$
Höhe der raucharmen Schicht	$> 1,50 \text{ m}$	$> 1,80 \text{ m}$
minimale Sichtweite	$> 10 \text{ m}$	$> 20 \text{ m}$
Temperatur der heißen Rauchgasschicht	$< 600 \text{ °C}$	$< 300 \text{ °C}$
Temperatur der unten liegenden Gasschicht	$< 65 \text{ °C}$	$< 50 \text{ °C}$

*) ingenieurmäßige Annahmen

Die Rauchabführung für sich allein kann nicht verhindern, dass ein Brand sich ausbreitet. Sie gewährleistet, dass das Feuer in dem belüfteten Raum eine fortgesetzte Sauerstoffversorgung hat, so dass es weiter wächst. Dies besagt, dass die Rauchabführung Sachwerte o. ä. nur dadurch schützen kann, in dem sie ermöglicht, dass das aktive Eingreifen der Feuerwehr schneller und wirksamer ist. Der Schutz des Eigentums durch Rauchabführung sollte daher als Sonderfall angesehen werden. In Abhängigkeit von den vorhandenen Materialien, könnte eine Entwicklungsphilosophie zum Schutz des Eigentums auf der Notwendigkeit basieren, eine heiße aufwärtsstrebende Rauchsicht oberhalb empfindlicher Materialien beizubehalten bzw. die Verrauchung von benachbarten Teilbereichen zu verhindern (i. d. R. Festlegung der erforderlichen Rauchsichthöhen oder der Anforderung an Rauchabschlüsse) oder sie könnte auf der Notwendigkeit basieren, die Rauchsichttemperatur unter einer kritischen Tempera-

tur zu halten. In beiden Fällen müssen die Funktionsanforderungen für die wesentlichen Parameter auf denen die Auslegungen basieren nicht die gleichen sein wie zum Hauptzweck der Rauchabfuhr als Lebensrettung. Die Auslegungen werden im Einzelfall von den jeweils vorherrschenden Umständen abhängen.

2.4 Sicherheitsaspekte bei der schutzzielorientierten Brandschutzbemessung

Die Festlegung der Schutzziele kann nicht losgelöst von den möglichen zu berücksichtigenden Brandverläufen gesehen werden. Unter Beachtung der Auftretenswahrscheinlichkeit verschiedener Brandverläufe und der Zuverlässigkeit der vorgesehenen Maßnahmen (z. B. Branderkennung, Brandbekämpfung, bauliche Elemente wie Abtrennungen ohne qualifizierte Feuerwiderstandsdauer) müssen diese so festgelegt werden, dass eine ausreichend hohe Sicherheit bzw. geringe Versagenswahrscheinlichkeit der Maßnahmen gegeben ist. Bei hinreichend unwahrscheinlichen, d. h. bei auf der sicheren Seite liegenden Brandszenarien, genügen geringe Sicherheitszuschläge bei der Definition der Schutzziele. Bei den „wahrscheinlichen Brandverläufen“ müssen gegebenenfalls größere Zuschläge bei den Grenzwerten für die Schutzziele berücksichtigt werden.

In Abweichung von den Regelungen im Zusammenhang mit DIN 18230, bei denen die Standicherheit der Bauteile für ein definiertes Brandszenarium ermittelt werden darf, das der Bestimmung den dort verwendeten Wärmeabzugsfaktoren w zugrunde gelegen hat, sind bei den Brandszenarien zur Beurteilung der Rauchfreihaltung die tatsächlichen Gegebenheiten in Bezug auf das zu erwartende Abbrandverhalten der im Gebäude vorhandenen brennbaren Stoffe zu berücksichtigen. Bei DIN 18230 wird ein Versagen der Tragkonstruktion bzw. des Raumabschlusses mit einer bedingten Versagenswahrscheinlichkeit akzeptiert, die über die verwendeten Sicherheitsbeiwerte in die Berechnungen einfließt. Da in dem o. g. Konzept zum Nachweis der Rauchfreihaltung der zeitliche Verlauf des Abbrandes eine wesentliche Rolle spielt, sollte ein wesentlicher Teil der Sicherheiten in das Brandszenarium, d. h. den der Berechnung zugrunde liegenden Annahmen zur Abbrandentwicklung des Bemessungsbrandszenariums, integriert werden. Ein geringerer Teil, der i. w. die Modellunsicherheiten berücksichtigt, sollte dagegen in die oben definierten zulässigen Grenzzustände einfließen.

Für diese Regelung gibt es derzeit keine allgemeingültige Vorschriften oder Vorschläge. In diesem Zusammenhang sind verbindliche Festlegungen auf ggf. nutzungsabhängige Bemessungsbrandszenarien erforderlich. International werden dazu z. B. in ISO TC 92 Anstrengungen unternommen, sogenannte „design fires“ zu entwickeln, die den rechnerischen Nachweisen mit modernen Ingenieurmethoden nach der Wärmebilanzmethode zugrunde zu legen sind. Die Anwendung dieser „design fires“ sollte in der Praxis sinnvollerweise vor der Erstellung eines Gutachtens unter Verwendung von schutzzielorientierten Methoden mit den zuständigen Behörden abgestimmt werden, solange die o. g. Bemessungsbrandszenarien nicht verbindlich (z. B. durch CEN-Normen) festgelegt sind. Mittelfristig sind derartige Festlegungen dringend erforderlich.

3 Der Brand

3.1 Einleitung

Der Brand lässt sich allgemein folgendermaßen definieren:

Nach den Normen der Feuerwehren DIN 14011 und ÖNORM F 1000 Teil 2 versteht man unter dem Begriff Brand ein *"nicht bestimmungsgemäßes Brennen, das sich unkontrolliert ausbreiten kann."*

Hinsichtlich der äußeren Erscheinungsform eines Brandes unterscheidet man zwischen Flammenbrand und Glutbrand [1]. Der Unterschied liegt darin, dass der Flammenbrand bei einer Verbrennung von Gasen und Dämpfen, der Glutbrand bei einer Verbrennung von festen, pyrolysierenden Stoffen auftritt. Bei der Verbrennung fester Stoffe ist grundsätzlich das Auftreten beider Brandarten möglich (s. Abbildung 3.1).

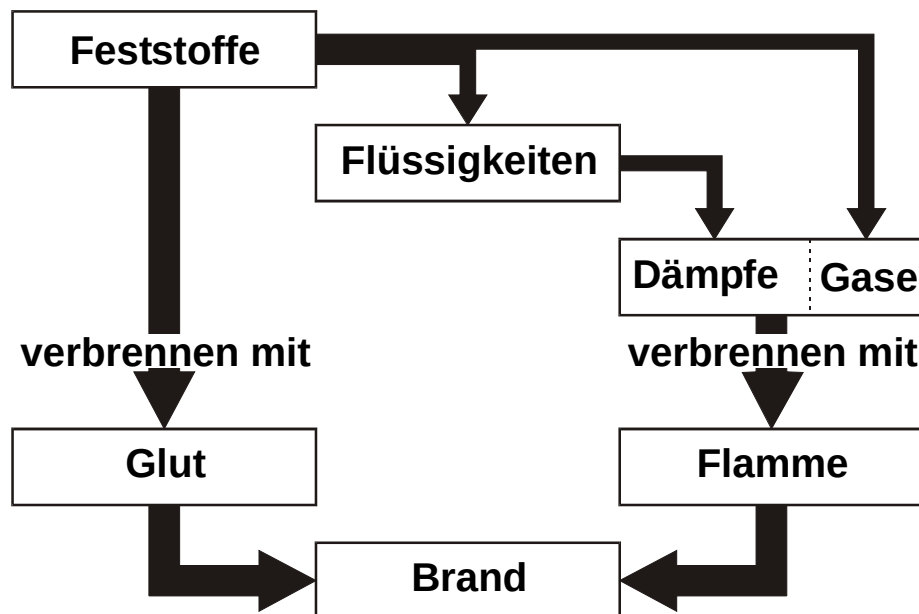


Abbildung 3.1: Erscheinungsformen von Bränden nach [1]

Die Voraussetzungen für die Brandentstehung werden üblicherweise im sogenannten Brand-dreieck dargestellt (s. Abbildung 3.2).

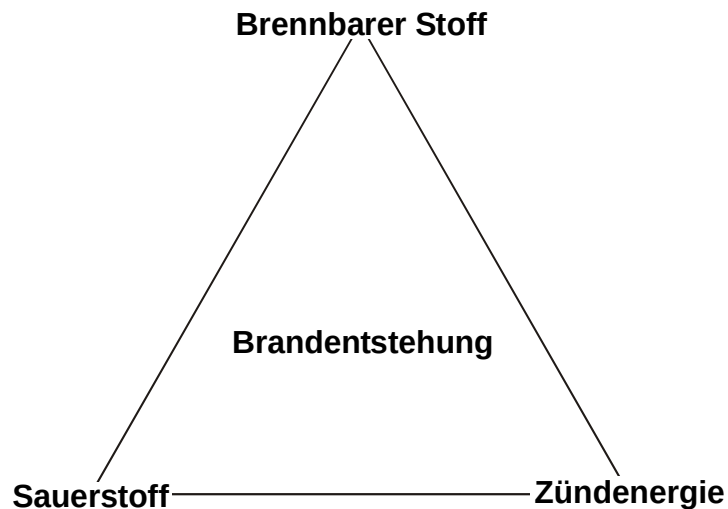


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der für eine Brandentstehung notwendigen Voraussetzungen (Branddreieck)

Die oben genannten materiellen und energetischen Voraussetzungen müssen stets gleichzeitig erfüllt sein, um eine Brandentstehung zu verursachen und den Brand aufrecht zu halten. Beim Fehlen von nur einer dieser Voraussetzungen ist ein Brand unmöglich.

3.2 Physikalische und chemische Vorgänge beim Brand

Brände sind ihrer Natur nach exotherme Reaktionen, die den Grundsätzen der Chemie unterliegen. Aber auch physikalische Einflüsse spielen während eines Brandes eine wesentliche Rolle. Die wissenschaftliche Beschreibung

- der chemischen Grundlagen der Verbrennung,
- der physikalischen Grundlagen der Verbrennung und
- des Verbrennungsvorganges

ist Gegenstand der Fachdisziplin „Wärme- und Brennstofftechnik“. Darauf kann hier nicht näher eingegangen werden. Die Verbrennung an sich ist ein chemischer und physikalischer Vorgang, wobei die Physik die Zustände und Zustandsänderungen der Materie und die Chemie die stofflichen Eigenschaften der Materie und die zugehörigen Stoffänderungen beschreiben.

3.2.1 Der Verbrennungsvorgang

Bei der Verbrennung handelt es sich um eine chemische Reaktion, bei dem sich ein brennbarer Stoff unter Wärmeentwicklung und Feuererscheinung mit Sauerstoff zu den Verbrennungsprodukten verbindet. Aufgrund des ersten chemischen Massengesetzes bzw. "*Gesetz von der Erhaltung der Masse*", welches erstmals zu Ende des 18. Jahrhunderts von Lavoisier und Lomonossow klar formuliert wurde, ergibt sich, dass ein Brennstoff nicht "verbrennt", sondern dass bei einem Brand Stoffumwandlungen stattfinden, die in der Chemie als chemische Vorgänge (chemische Reaktionen) bezeichnet werden. Chemische Reaktionen sind mit Energieumsetzungen gekoppelt, wobei Verbrennungsvorgänge immer exotherme Vorgänge

sind, d. h., es werden große Energiebeträge in Form von Licht und Wärme frei. Das resultiert daraus, dass jeder Stoff einen bestimmten Energiegehalt hat, der sich beim Zusammentreten mehrerer Stoffe verändert, wobei im Falle der Verbrennung (exotherme Reaktion) überschüssige Energie abgegeben wird. Diese Energie wird als Brennwert des brennenden Stoffes bezeichnet. Der für die Verbrennung nötige Sauerstoff ist selbst unbrennbar, er ermöglicht aber das Verbrennen anderer Stoffe.

Demnach werden bei einem Brand die brennbaren Stoffe und der Sauerstoff unter Freiwerden von Wärme (Brandtemperatur bis 1500° C) umgewandelt, und es entstehen neue, feste und gasförmige Verbrennungsprodukte. Feste Verbrennungsprodukte sind überwiegend unschädliche anorganische Anteile (Asche) bzw. nicht verbrannte Kohlenstoffe (Ruß). Als gasförmige Verbrennungsprodukte (Rauchgase) können neben Wasserdampf (H_2O) und nicht giftigem, aber erstickend wirkendem Kohlendioxid (CO_2) auch Atemgifte wie Kohlenmonoxid (CO), Salzsäure (HCl), Nitrose Gase (NO, NO_2), Phosgen ($COCl_2$), Blausäure (HCN), Methylalkohol (CH_3OH) und Dioxine auftreten.

Die Physik spielt insofern bei der Verbrennung eine Rolle, als durch die Wärmezufuhr eine

- Änderung der Aggregatzustände,
- Änderung der Temperatur,
- Ausdehnung (Volumenzunahme) und eine
- Änderung der mechanischen Eigenschaften

der betroffenen Stoffe bzw. Bauteile erfolgt.

Neben diesen Wirkungen der Wärme besitzen Stoffe bzw. Bauteile die Fähigkeit, Wärme durch

- Wärmeleitung,
- Konvektion und
- Wärmestrahlung

zu transportieren. Alle drei Effekte spielen bei dem Verbrennen von Stoffen, bei der Brandentwicklung und Ausbreitung sowie bei den Auswirkungen von Bränden in Gebäuden eine entscheidende Rolle.

Auch das Verhältnis der Oberfläche eines Stoffes zu seiner Masse ist eine wichtige Zustandsgröße, die brandschutztechnisch entsprechend berücksichtigt werden muss. So zählt z. B. kompaktes Eisen zu den nichtbrennbaren Stoffen, jedoch kann Eisenpulver unter bestimmten Voraussetzungen entzündet werden und neigt sogar zur Selbstentzündung. Die Form und Verteilung brennbarer Stoffe ist somit entscheidend für ihre Brennbarkeit und die zu erwartende Verbrennungseffektivität.

3.2.2 Grundlagen der Verbrennungsprozesse

Die meisten Schadenfeuer sind mit dem Abbrand brennbarer Feststoffe verbunden, allerdings sind teilweise auch brennbare Flüssigkeiten und Gase betroffen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen und zum Teil komplexen chemischen Zusammensetzung von Stoffen lässt sich das Brandverhalten nicht einheitlich beschreiben. Zu unterscheiden sind:

- Gasbrände von Kohlenwasserstoffen aufgrund der Reaktion mit Luftsauerstoff,

- Flüssigkeitsbrände aufgrund der Verdampfung an der Flüssigkeitsoberfläche und Reaktionen mit Luftsauerstoff,
- Feststoffbrände aufgrund einer chemischen Zersetzung oder Pyrolyse zur Erzeugung brennbarer Produkte, welche mit dem Luftsauerstoff reagieren.

Prinzipiell geht es beim Verbrennen von Feststoffen darum, Stoffe mit im allgemeinen sehr hohem Molekulargewicht in Komponenten mit niedrigem Molekulargewicht umzuwandeln und diese zu verbrennen. Die Umwandlung erfordert relativ viel Energie, d. h. viel mehr als beispielsweise eine reine Verdampfung, so dass das Verbrennen von Feststoffen nur bei vergleichsweise hohen Oberflächentemperaturen (typischer Wert: 400°C) erfolgt. Die Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte, die aus den Feststoffoberflächen entweichen können, ist sehr komplex, wobei der chemische Aufbau des Feststoffes für den Pyrolyseprozess von grundlegender Bedeutung ist.

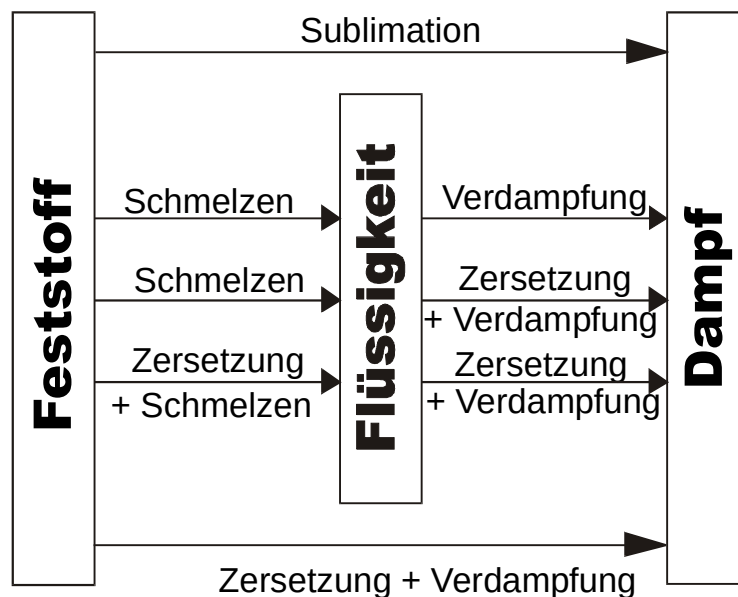


Abbildung 3.3: Thermische Zersetzung von brennbaren Feststoffen oder Flüssigkeiten im Brandfall nach [1]

Die thermische Zersetzung kann über die Gasphase (Sublimation) aufgrund eines Schmelzvorganges oder über die Pyrolyse erfolgen. Kombinationen der o. g. Vorgänge sind ebenfalls möglich. In der Abbildung 3.3 sind die verschiedenen Möglichkeiten der thermischen Zersetzung von Feststoffen angegeben. Bei Flüssigkeiten entfallen die Prozesse Sublimation und Schmelzen, d. h., es finden lediglich Verdampfungen und Zersetzungen statt.

Im allgemeinen verbrennen die Zersetzungsprodukte mit Flammenbildung. In Sonderfällen (Glutbrände o. ä.) kommt es jedoch nur zu einem Glimmen und einer starken Rauchbildung, d. h. die Pyrolyseprodukte kondensieren im wesentlichen in der kalten Luft und bilden Aerosole ohne Flammenbildung. Die einfachste Form der Verbrennung von reinen Feststoffen bzw. Gasen lässt sich anhand einer linearen Pyrolysegleichung bzw. Reaktionsgleichung beschreiben:

$$\dot{m} = -k \cdot m \quad \text{Gl. (3.1)}$$

Darin sind:

$\dot{m}$ Abbrandrate in kg/s

m Masse des brennenden Stoffes bzw. Gases in kg

k Pyrolysekoeffizient in s^{-1} .

Die Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit des Prozesses lässt sich durch die Arrhenius-Gleichung beschreiben:

$$k = A \cdot \exp(-E_A/RT) \quad \text{Gl. (3.2)}$$

Darin sind:

A Frequenzfaktor in s^{-1}
T absolute Temperatur in K
 E_A Aktivierungsenergie in J/mol
R Gaskonstante = 8.314 J/mol K.

Die Aktivierungsenergien für Kunststoffe liegen typischerweise zwischen 18 kJ/mol (Phenolharz) und 72 kJ/mol (Polymethylen), wobei die Zersetzungstemperaturen zwischen 225° C und 396° C liegen. Grundsätzlich sind die Werte A und E_A nach der Gl. (3.2) für die meisten Stoffe jedoch nicht bekannt, so dass die praktische Anwendung von Gl. (3.1) bei Feststoffen im allgemeinen nicht möglich ist.

Bei der Verbrennung sind prinzipiell zwei unterschiedliche Arten der Flammenbildung zu unterscheiden:

- Die Vormischflamme – bei welcher sich der Brennstoff mit der Luft vor dem Verbrennen vermischt,
- die Diffusionsflamme – bei welcher sich der Brennstoff mit dem von außen hinzutretenden Sauerstoff verbindet und spontan verbrennt.

Bei Diffusionsflammen ist die Abbrandrate somit direkt mit der Rate der Gasproduktion und dem Sauerstoffzutritt verbunden, d. h., es findet eine verzögerungsfreie Verbrennung statt. Eine besondere Situation entsteht bei der Verbrennung von Flüssigkeiten und Feststoffen, weil die Produktion der Verdampfungs- bzw. Pyrolyseprodukte auf der Brennstoffoberfläche unmittelbar mit der Energiezufuhr und -abfuhr an der entsprechenden Oberfläche verbunden ist (s. Abbildung 3.4), d.h., die Produktionsrate und Abbrandrate sind über verschiedene Mechanismen untereinander verknüpft. Daraus wurden in der Brandforschung verschiedene Abbrandmodelle für Feststoffe und Flüssigkeiten abgeleitet.

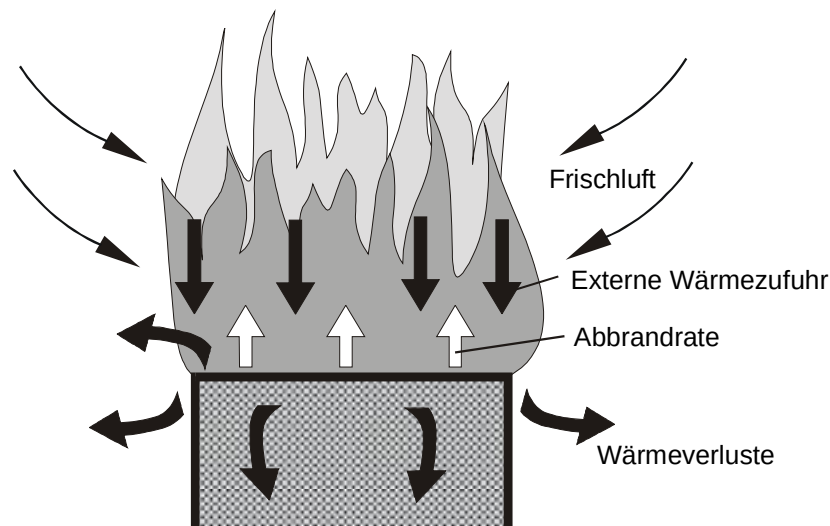


Abbildung 3.4: Wärme- und Stofftransportvorgänge einer brennenden Oberfläche

Die spezifische Verbrennungsrate auf der Oberfläche eines Feststoffes ist gegeben durch:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_F - \dot{Q}_L}{L_v} \quad \text{Gl. (3.3)}$$

Darin sind:

- $\dot{m}$ spezifische Abbrandrate in $\text{g/m}^2\text{s}$
- $\dot{Q}_F$ Wärmezufuhr durch die Flamme oder Umgebung (Strahlung) in kW/m^2
- $\dot{Q}_L$ Wärmeabfuhr durch Verluste (Wärmeableitung etc.) in kW/m^2
- L_v Wärmeenergie zur Produktion der Pyrolysegase oder Dämpfe in kJ/g .

Die Energiefreisetzung bzw. Brandleistung durch die Verbrennung ist damit gegeben durch:

$$\dot{Q}_C = \dot{m} \cdot H_U \cdot \chi \cdot A_f \quad \text{Gl. (3.4)}$$

Darin sind:

- $\dot{Q}_C$ Brandleistung in kW
- $\dot{m}$ Abbrandrate in $\text{kg/m}^2\text{h}$
- H_U Heizwert in kWh/kg
- χ Verbrennungseffektivität bei unvollständiger Verbrennung (-)
- A_f Brandfläche in m^2 .

Die spezifische Brandleistung hängt in der Praxis von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab. Neben den o. g. Materialeigenschaften H_U und L_v spielen der Verbrennungsprozess und damit verbunden insbesondere der Luftwechsel mit der Umgebung sowie der Energieaustausch infolge Konvektion und Strahlung eine entscheidende Rolle. Durch Umformung der Gl. (3.3) und Gl. (3.4) erhält man:

$$\frac{\dot{Q}_C}{A_f} = (\dot{Q}_F - \dot{Q}_L) \cdot \chi \cdot \left(\frac{H_U}{L_v} \right) \quad \text{Gl. (3.5)}$$

In der nachstehenden Tabelle 3.4.1 sind einige charakteristische Verbrennungsdaten von Feststoffen und Flüssigkeiten zusammengestellt. Die Pyrolyseenergie L_v wurde durch Messung des Gewichtsverlustes in einer Stickstoffumgebung unter definiertem Wärmefluss gemessen. Der untere Heizwert H_U wurde im Bombenkalorimeter bestimmt.

Tabelle 3.1: Verbrennungsdaten von Feststoffen und Flüssigkeiten

Brennstoff	H_U [kJ/g]	H_U/L_v	H_U/O_2 [kJ/gO ₂]	L_v [kJ/g]
Eiche (red oak)	11,1*	2,96	14,55	3,74
PU-Schaum (hart)	24,12	5,14-8,37	13,99	1,52
Polyoxymethylengranulat	15,46	6,37	14,50	-
PU-Schaum (flexibel)	23,04	6,63-13,34	13,99	1,22
PVC-Granulat	18,00	6,66	12,96	-
Nylon-Granulat	29,58	13,10	12,67	-

Epoxid-FR-Glasfaser	20,33	13,38	-	1,52
PMMA-Granulat	24,84	15,46	12,98	1,62
Polystyrolschaum (hart)	39,85	20,51- 30,02	12,97	-
Polypropylengranulat	43,31	21,37	12,66	-
Polystyrolgranulat	39,96	23,04	12,97	1,76
Polyethylengranulat	43,28	24,84	12,65	-
Polyethylenschaum	43,28	30,02	12,65	-
Methanol (liquid)	19,80	16,50	13,22	1,20
Styrol (liquid)	40,51	63,30	-	0,64
Heptane (liquid)	44,60	92,83	-	0,48

*) berechnete Werte

Anhand der berechneten Heizwerte für Eiche und glasfaserverstärktes Epoxidharz, welche tatsächlich ca. 50 % größer sind als sie errechnet wurden, wird deutlich, dass die angegebenen Verbrennungsgleichungen nur bedingt gültig sind. Tatsächlich ist es bisher kaum möglich, das Brandverhalten von Feststoffen theoretisch genau zu beschreiben.

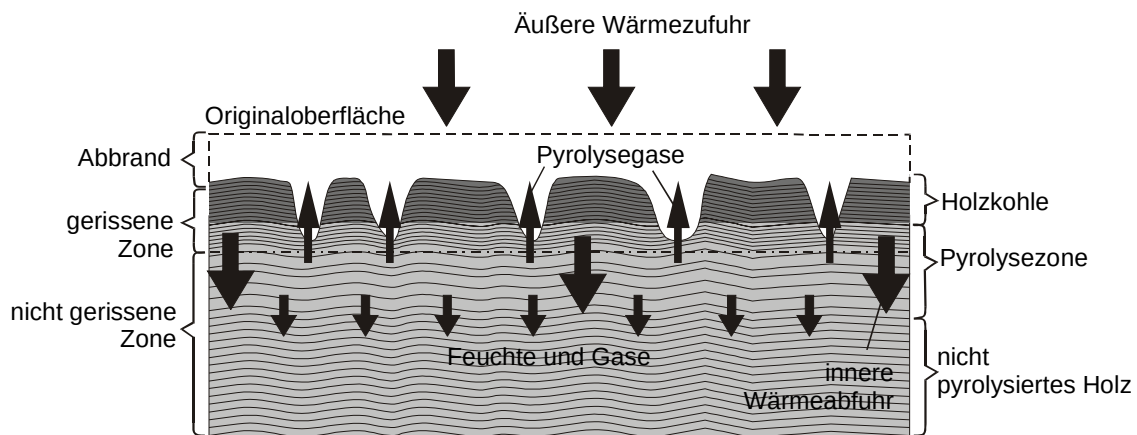


Abbildung 3.5: Abbrand eines Holzquerschnittes

Bereits die Beschreibung des Abbrandverhaltens von Holz bereitet allergrößte Schwierigkeiten, weil neben der Pyrolyse hierbei die Verkohlung und Rissbildung der Oberflächenzone sowie der dazu parallel ablaufende Feuchtetransport eine entscheidende Rolle spielen (s. Abbildung 3.5).

Die Schadenfeuer von brennbaren Flüssigkeiten lassen sich demgegenüber noch am ehesten theoretisch beschreiben. Zu unterscheiden sind dabei Brände in offenen Behältern und Lachenbrände, wobei die Größe der Lachen von der Beschaffenheit des Bodens sowie der Viskosität und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit abhängt.

Für den Abbrand brennbarer Flüssigkeiten in offenen Wannen mit > 0,2 m Durchmesser (pool fires) wird in der Literatur die folgende Beziehung angegeben:

$$\dot{m} = \dot{m}_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot \beta \cdot D}) \quad \text{Gl. (3.6)}$$

Darin sind:

- $\dot{m}$ Abbrandrate bei einem Pooldurchmesser D in $\text{kg/m}^2\text{s}$
- D Pooldurchmesser in m
- k Extinktionskoeffizient in m^{-1}

- β Korrektur der freien Weglänge (-)
 $\dot{m}_\infty$ Abbrandrate bei unendlichem Pooldurchmesser in $\text{kg/m}^2\text{s}$.

Die zugehörige Brandleistung errechnet sich aus:

$$\dot{Q}_C = H_U \cdot \dot{m} \cdot A_f \quad \text{Gl. (3.7)}$$

Darin sind:

- H_U Heizwert in kJ/kg
 $\dot{Q}_C$ Brandleistung in kJ/s
 A_f Pool- bzw. Brandfläche in m^2 .

In der nachstehenden Tabelle 3.4.2 sind für einige brennbare Flüssigkeiten die entsprechenden Eingangsgrößen zusammengestellt. Die angegebenen Werte T_f geben die erwarteten Flammentemperaturen an.

Tabelle 3.2: Eingangsdaten für Poolbrände

Material	Dichte [kg/m^3]	H_U [MJ/kg]	$\dot{m}_\infty$ [$\text{kg/m}^2\text{/s}$]	$k \cdot \beta$ [m^{-1}]	K [m^{-1}]	T_f [K]
Alkohole						
Methanol	796	20,0	0,017	-	-	1300
Ethanol	794	26,8	0,015	-	0,4	1490
Organische Flüssigkeiten						
Butane	573	45,7	0,078	2,7 ($\pm 0,3$)	-	-
Benzene	874	40,1	0,085	2,7 ($\pm 0,3$)	4,0	1460
Hexane	650	44,7	0,074	1,9 ($\pm 0,4$)	-	1300
Heptane	675	44,6	0,101	1,1 ($\pm 0,3$)	-	-
Xylene	870	40,8	0,090	1,4 ($\pm 0,3$)	-	-
Acetone	791	25,8	0,041	1,9 ($\pm 0,3$)	0,8	-
Petroleum Produkte						
Benzine	740	44,7	0,048	3,6 ($\pm 0,4$)	-	-
Gasoline	740	43,7	0,055	2,1 ($\pm 0,3$)	2,0	1450
Kerosin	820	43,2	0,039	3,5 ($\pm 0,8$)	2,6	1480
Transformer oil	760	46,4	0,039	0,7	-	1500
Hydrocarbon						
Fuel oil, heavy	940-1000	39,7	0,035	1,7 ($\pm 0,6$)	-	-
Crude oil	830-880	42,6	0,022- 0,045	2,8 ($\pm 0,4$)	-	-
Feststoffe						
Polymethyl- methacrylate	1184	24,9	0,020	3,3 ($\pm 0,8$)	1,3	1260

3.3 Ablauf eines Schadenfeuers

Betrachtet man die idealisierte Darstellung eines Naturbrandes (s. Abbildung 3.6) so erkennt man das der Brand grundsätzlich in vier einzelne Abschnitte unterteilbar ist. Nach der Initiierung durch eine beliebige Zündquelle muss sich der Brand entwickeln (Entwicklungsbrand). Diese Phase des Brandes ist gekennzeichnet durch geringe Temperaturerhöhungen im Raum infolge der niedrigen Brandleistung. Typische Werte für die Brandleistung in dieser Phase liegen bei 25 bis 50 kW/m² (s. Tabelle 3.3). Die Zeitdauer dieser Entwicklungsphase ist in der Regel nicht determinierbar. Sie kann zwischen wenigen Minuten bis Stunden dauern [1].

Der Entwicklungsphase des Brandes kann unter bestimmten Umständen eine Vollbrandphase folgen. Diese ist gekennzeichnet durch eine hohe Brandleistung und entsprechend hohe Temperaturen im Brandraum. Die Vollbrandphase wird eventuell eingeleitet durch einen Flash-over, d.h. eine spontane, schnelle Brandausbreitung mit entsprechend hohen Temperaturanstiegen.

Die Tabelle 3.3 zeigt die vier Brandphasen und die zugehörigen typischen Werte der Brandraumtemperaturen und spezifischen Brandleistungen.

Tabelle 3.3: Die vier charakteristischen Brandphasen eines vollständigen Schadenfeuers ohne Löschcheinwirkung nach [1]

Brandphase	Temperaturbereich in °C	Brandleistung in kW/m ²
Entzündung	20-50	< 25
Schwelen	50-150	25-50
Ausbreitung	500-1250	50-1200
Abklingen	500-20	< 200

Das Abklingen eines Brandes ohne Löschcheinwirkungen beginnt nach dem Abbrand wesentlicher Teile der brennbaren Stoffe. Im allgemeinen beginnt das Abklingen wenn 80% der Brandlast verbraucht sind (gilt für Wohnungsbrände).

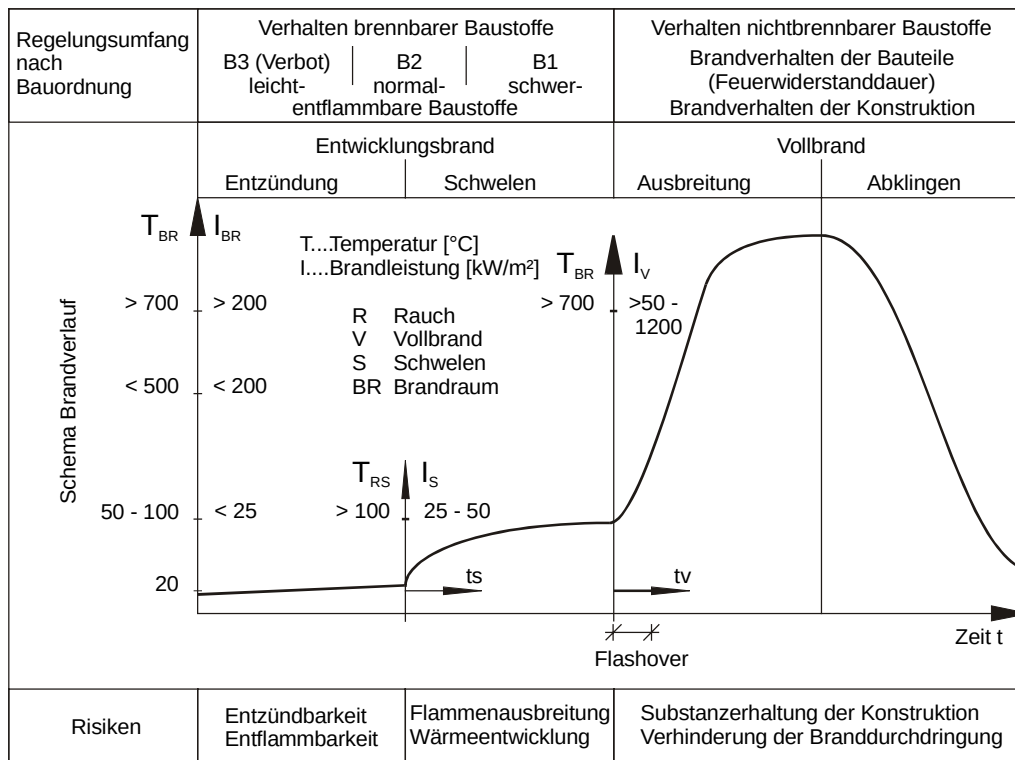


Abbildung 3.6: Brandphasen eines vollständigen Schadenfeuers

4 Design Fires und Bemessungsbrandszenarien

4.1 Einleitung

Der Nachweis der Brandsicherheit erfolgt bei den schutzzielorientierten Verfahren i.a. auf der Basis von numerischen Berechnungsverfahren oder durch normative Prüfverfahren, in seltenen Fällen auch durch experimentelle Untersuchungen.

Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter ist es derzeit nicht möglich, in allen Fällen das zu erwartende reale Schadenfeuer theoretisch exakt vorherzubestimmen. Aus diesem Grunde ist es im Rahmen der Ingenieurmethoden zum Nachweis ausreichender Brandsicherheit üblich geworden, sogenannte Brandszenarien („Fire Scenarios“), Bemessungsbrandszenarien („Design Fire Scenarios“) und Bemessungsbrände (Design Fires) zu definieren und anzuwenden. Die „Design Fires“ sind als Hilfsmittel und grober Ersatz für genauere Beurteilungen auf der Basis realer Schadenfeuer anzusehen.

Dem Brandszenarium, Bemessungsbrandszenarium und Bemessungsbrand liegen folgende Begriffsbestimmungen zu Grunde:

Fire scenario – Brandszenarium:

Eine Beschreibung eines Brandverlaufes mit zeitlich definierten Parametern die die Charakteristik des Brandes beschreiben und ihn von anderen möglichen Bränden differenzieren. Typi-

scherweise wird die Zündung, die Brandentwicklung, das Vollbrandstadium und die Abklingphase im Zusammenhang mit der Gebäudenutzung und den technischen Systemen, die den Brandverlauf beeinflussen, definiert (ISO /PDTR 13387-1).

Design Fire Scenario – Bemessungsbrandszenarium:

Ein spezifisches Szenarium von Brandereignissen mit der eine Brandschutzanalyse durchgeführt wird (ISO /PDTR 13387-1). Es beinhaltet die Quantifizierung des Brandverlaufes, die Beschreibung der Brandwirkungen auf das Gebäude, die betroffenen Personen und der Sicherheitssysteme.

Design Fire – Bemessungsbrand:

- Eine quantitative Beschreibung von angenommenen Feuercharakteristiken innerhalb eines Design Fire Szenarios. Typischerweise eine idealisierte Beschreibung von wichtigen zeitabhängigen Brandkenngrößen, wie Brandleistung, Brandausbreitung, Rauchbestandteilen, toxischen Bestandteilen und Temperatur (ISO /PDTR 13387-1).
- Definierter Brandverlauf, der bei der Brandschutzbemessung zugrunde gelegt wird (Eurocode 1, Teil 2-2).
- Der größte Brand, der sich hinsichtlich Ausdehnung und produzierter Wärmeleistung bis zum Einsetzen wirksamer Löschmaßnahmen entwickeln kann, und der Bemessung zugrunde gelegt wird (TRVB S 125/97).

Ausgehend von der Überlegung, dass Berechnungen von Brandabläufen unter komplexen Randbedingungen ehestens für die Rekonstruktion von Schadenfeuern von Bedeutung sind, ist die Festlegung eines repräsentativen Bemessungsbrandes für den Brandschutzentwurf dann geeignet, wenn dieser eine ausreichende Brandsicherheit gewährleistet.

Konzeptionell ist für die Festlegung der Brandeinwirkungen im Naturbrand folgendermaßen zu verfahren: Die zu erwartenden Brandabläufe sind für eine brandschutztechnische Bemessung so festzulegen, dass im tatsächlich auftretenden Brandfall der Brandverlauf nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit über dem Verlauf liegt, der für die Bemessung zugrundegelegt wurde. Diese Festlegung entspricht der Festlegung von Lastannahmen bei der statischen Berechnung, d. h. bei einer statischen Berechnung wird der Bemessung stets eine Belastung zugrundegelegt, die im Rahmen der vorgesehenen Nutzung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird.

Für eine objektive Festlegung von brandschutztechnischen Anforderungen müssen daher Brandverläufe so definiert werden, dass im Brandfall eine ausreichende Sicherheit dafür besteht, dass die Schutzziele erreicht werden. Treten im realen Brand Bedingungen auf, die über den festgelegten und der Bemessung zugrundegelegten Randbedingungen liegen, dann ist das Bemessungsbrandszenarium bzw. das Design Fire falsch gewählt.

4.2 Entwicklung und Auswahl von Bemessungsbrandszenarien für die Brandschutzanalyse

Der (richtigen) systematischen Auswahl und Festlegung von Bemessungsbrandszenarien für eine Brandschutzanalyse kommt eine große Bedeutung zu. Grundsätzlich sind verschiedene Bemessungsbrandszenarien zu entwickeln (auszuwählen) um verschiedene Schutzziele im Nachweisverfahren nachweisen zu können.

Die folgende Vorgangsweise bei der Auswahl (der Festlegung) von Bemessungsbrandszenarien ist einzuhalten.

- | | |
|-------------|--|
| Schritt 1: | Art des Brandes |
| Schritt 2: | Brandbereich |
| Schritt 3: | Potentielle Brandgefahren |
| Schritt 4: | Technische Systeme die einen Einfluss auf die Brandszenarium haben |
| Schritt 5: | Reaktion der Personen (im Gebäude) |
| Schritt 6: | Ereignisbaum |
| Schritt 7: | Wahrscheinlichkeiten |
| Schritt 8: | Abschätzung der Folgen |
| Schritt 9: | Risikobewertung |
| Schritt 10: | Auswahl der relevanten Bemessungsbrandszenarien und Dokumentation |

4.2.1 Schritt 1: Art des Brandes

Auf der Basis von Brandstatistiken oder der ingenieurmäßigen Erfahrung sind für das betrachtete Gebäude in Abhängigkeit seiner Nutzung und weiteren Annahmen zwei grundsätzliche Bemessungsbrandszenarien zu identifizieren:

- das am häufigsten auftretende Brandszenarium,
- das Brandszenarium mit den größten Konsequenzen.

Das am häufigsten auftretende Brandszenarium ergibt sich in der Regel aus den am häufigsten vorhandenen Zündquellen. Für das Brandszenarium mit den größten Konsequenzen wird auf einer statistischen Basis, oder auf anwendbaren und übertragbaren Brandereignissen der Vergangenheit für das untersuchte Gebäude festgelegt.

4.2.2 Schritt 2: Brandbereich

Für jedes in Schritt 1 identifizierte Szenarium ist die Festlegung des Bereiches (Raumes) notwendig in dem ein identifiziertes Brandszenarium auftreten kann.

4.2.3 Schritt 3: Potentielle Brandgefahren(-katastrophen)

In diesem Schritt werden für das zu bewertende Objekt mögliche Szenarien mit fatalen Brandfolgen (Tote, großer Sachschaden) bewertet und identifiziert. Solche Szenarien können beispielsweise sein:

- Brand in einer Versammlungsstätte,
- Brand in einem Fluchtweg,
- der Brand zerstört die Gebäudestruktur,
- ein sehr schnell ablaufender Brand,
- es sind gefährliche (toxische, radioaktive) Materialien am Brand beteiligt oder können durch diesen freigesetzt werden.

Führen solche Ereignisse zu einem kritischeren Szenarium so sind die in Schritt 1 und 2 definierten Szenarien durch dieses Szenarium zu ersetzen.

4.2.4 Schritt 4: Technische Systeme die einen Einfluss auf die Brandszenarium haben

Der Einfluss von technischen Systemen auf ein angenommenes Brandszenarium einen Einfluss haben werden in diesem Schritt bewertet. Solche technischen Systeme sind nicht nur Anlagen, Einrichtungen sondern auch Reaktionen des Gebäudes auf Einflüsse von außen (bspw. Wind) bzw. das Verhalten von Gebäudekomponenten. Typische Einflussfaktoren sind z.B.:

- Art des Brandes (Schwelbrand, Flammbrand),
- Windeinfluss,
- Türen und Tore im Bereich des Brandentstehungsortes (geschlossen oder offen),
- Fenster (bricht das Glas)
- Brandrauchmanagement (wirkt wie erwartet oder versagt)
- Brandmeldung (wann wird gemeldet, versagt)
- Automatische Löscheinrichtungen (funktionieren wie erwartet oder versagen)
- Alarmierungseinrichtungen (funktionieren wie erwartet oder versagen)
- Evakuierungssystem (Kapazität und Einrichtungen wie dimensioniert oder verkleinert)
- Compartmentierung (Brandabschnittsbildung funktioniert wie erwartet oder versagt)
- Konstruktionselemente (verhalten sich wie ausgelegt oder versagen)

4.2.5 Schritt 5: Reaktion der Personen (im Gebäude)

Im 5. Schritt wird auf das Verhalten (der Reaktionen) der Gebäudebewohner und den daraus resultierenden Einfluss auf den Brandverlauf eingegangen. Typische Betrachtungsweisen sind:

- Reaktion der Gebäudebewohner auf einen Alarm (normal oder verzögert)
- Löschversuche der Gebäudebewohner (erfolgreich oder nicht erfolgreich)

4.2.6 Schritt 6: Ereignisbaum

Die ermittelten Einflussfaktoren die den Brandverlauf maßgeblich beeinflussen können werden in Form eines Ereignisbaumes dargestellt. Jeder Pfad im Ereignisbaum repräsentiert ein Brandszenarium zur Bewertung.

Der Ereignisbaum startet in der Regel mit einer Zündung und verzweigt sich in Abhängigkeit der betrachteten Faktoren bis ein mögliches Brandszenarium definiert ist.

4.2.7 Schritt 7: Wahrscheinlichkeiten

Auf der Basis des in Schritt 6 entwickelten Ereignisbaumes können nun durch statistische und/oder ingenieurmäßigen Überlegungen die Wahrscheinlichkeit des Eintrittes der entstandenen Brandszenarien bewertet werden.

4.2.8 Schritt 8: Abschätzung der Folgen

In diesem Schritt werde die Konsequenzen aus den in Schritt 6 entwickelten möglichen Brandszenarien abgeschätzt.

4.2.9 Schritt 9: Risikobewertung

Durch Multiplikation der in Schritt 7 ermittelten Wahrscheinlichkeiten und der in Schritt 8 ermittelten Konsequenzen erhält man ein relatives Risiko für ein mögliches Brandszenarium. Die möglichen Brandszenarien werden nach den relativen Risiken sortiert.

4.2.10 Schritt 10: Auswahl der relevanten Bemessungsbrandszenarien und Dokumentation

Das in Schritt 9 mit dem höchsten relativen Risiko bewertete Brandszenarium wird zur quantitativen Analyse ausgewählt. Das ausgewählte Brandszenarium sollte die Hauptmenge der Risiken der anderen Brandszenarien abdecken. In dieser Stufe sollten auch die Behörden eine Stellungnahme abgeben. Für eine konsequente Analyse sollten hingegen alle im Ereignisbaum erstellten Brandszenarien analysiert werden.

Das (die) zur Analyse ausgewählte(n) Brandszenarium(en) muss (müssen) dokumentiert werden. Diese Brandszenarien werden damit zu Bemessungsbrandszenarien.

4.3 Design Fires

4.3.1 Aufgabe von Design Fires

Nach der Definition eines Bemessungsbrandszenariums ist es möglich die Charakteristik des zugrundeliegenden Feuers zu beschreiben. Die angenommene Charakterisierung des Feuers wird als „design fire“ oder Bemessungsbrand bezeichnet.

Der Bemessungsbrand hat die Anforderungen bzw. die Grundannahmen des Bemessungsbrandszenariums zu erfüllen.

Bemessungsbrände werden üblicherweise durch die folgende Parameter in Abhängigkeit der Zeit (sofern für die Analyse notwendig) charakterisiert:

- Energiefreisetzung,
- Brandausbreitung (Brandgröße),
- Produktion von toxischen Bestandteilen,
- Rauchproduktion,
- Temperatur,
- Zeit bis zum Erreichen bestimmter Schlüsselereignissen (z.B. Flashover).

Für bestimmte numerische Nachweise im Brandschutzdesign können auch noch andere Parameter charakterisiert werden (z.B. Wärmestrom im Bemessungsverfahren für außenliegende, sich nicht in der Flamme befindliche Bauteile).

Zur Betrachtung eines Bemessungsbrandszenariums kann es notwendig sein, mehrere Design Fire zu verwenden.

4.3.2 Systematisierung von Design Fires

Eine mögliche Gliederung bzw. Systematisierung von Design Fires kann unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Solche Gesichtspunkte für Design Fires können sein:

- Design Fire für die Prüfung von Baustoffen
- Eingangsdaten für Design Fires bei ingenieurmäßigen Verfahren.

Eine weitere Unterscheidung kann auf der Basis der Komplexität der Beschreibung des Design Fires erfolgen, man kann unterscheiden zwischen:

- einfache Größen-Zeit Angaben (bspw. Temperatur – Zeit - Kurven)
- komplexe parametrische Design Fire
- ingenieurmäßig abgeleitete Design Fire (experimentell oder rechnerisch ermittelt)

Die Festlegung der Design Fire kann, unabhängig von der Art, normativ (bspw. ETK nach DIN 4102-2) oder ingenieurmäßig sein.

Tabelle 4.1: Gliederung der Design Fires nach den obigen Angaben

Bezugsgrößen aus den Design Fires	
Temperatur	Brandleistung

Einfache Design Fires	
$T = f(t)$	Nicht bestimmt
Genormte Temperatur-Zeit-Kurve	
Komplexe Design Fires	
$T = f(t, w, c, q)$	$Q = f(t)$
Parametrische Temperatur-Zeit-Kurve	Brandleistung
Ingenieurmäßig abgeleitete Design Fires	
$T = f(t, w, c, q)$	$Q = f(t, w, c, q)$
berechnete (gemessene) Temperatur-Zeit-Kurve	berechnete (gemessene) Brandleistung

Darin sind:

T	Temperatur [°C]
Q	Brandleistung [kW] oder [kW/m ²]
t	Zeit [min]
w	Öffnungsgrad bzw. Ventilation im Gebäude
c	Wärmeübergang an raumabschließende Bauteile
q	Bemessungswert der Brandbelastung [kW/m ²]

Wie aus Tabelle 4.1 hervorgeht, handelt es sich abhängig von der Vielzahl der zur Beschreibung des Bemessungsbrandes einfließenden Parameter um einfache oder komplexe Design Fires, die zur Brandmodellierungen herangezogen werden können. Ausgehend von dieser Gliederung kann eine Systematisierung gemäß Abbildung 4.1 erstellt werden.



Abbildung 4.1: Systematisierung und Gliederung von Design Fires nach ihrer Komplexität

4.3.3 Design Fire beruhend auf normativen Temperatur-Zeit-Kurven

Normierte Temperatur – Zeit - Kurven werden für einen festgelegten Zeitraum angewendet. Die Hauptanwendungsgebiete dieser Design Fire liegen in der Prüftechnik und der Tragwerksbemessung. Diese Design Fire können verschiedene Brandphase widerspiegeln. Bis auf wenige Ausnahmen sind diese Belastungskurven normativ (quasi normativ) festgelegt worden. Das Grundlagendokument Brandschutz der EU gibt drei sogenannte „konventionelle Brandszenarien“ vor. Diese sind:

- die Einheits-Temperaturkurve (ISO 834, Teil 1),
- die harmonisierte Hydrokarbon-Kurve und
- die Schwelfeuerkurve.

Im Eurocode ENV 1 1991-2-2 wird zusätzlich eine weitere normative Temperatur-Zeit-Kurven festgelegt, die „Externe Brandkurve“.

Für bestimmte Brandfälle sind weitere nominelle Temperatur-Zeit-Kurven festgelegt worden, diese sind aber nicht normativ (zumindest im europäischen Bereich) festgelegt. Eine solche Kurve ist die RABT – Kurve für Tunnelbrände

4.3.3.1 Einheits-Temperaturkurve (ISO 834, Teil 1)

Die Einheits-Temperaturkurve(ETK) beschreibt die Temperaturerhöhung für einen vollentwickelten Brand. Sie wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad \text{Gl. (4.1)}$$

Darin sind:

T Gastemperaturerhöhung [°K]
t Zeit [min]

Ausgehend von der ETK werden für die Prüfung bestimmter Bauteile im Grundlagendokument (GD) weitere Design Fire definiert die dem Verlauf der ETK bis zu einer bestimmten Grenztemperaturerhöhung folgen und dann bis zum Prüfeinde konstant gehalten werden. Solche Grenztemperaturen liegen bei 300°C, 600°C und 820 °C.

4.3.3.2 Harmonisierte Hydrokarbon-Kurve

Brände von Kohlenwasserstoffen können deutlich höhere Temperaturen in kürzerer Zeit in einer Vollbrandsituation erreichen als die ETK angibt. Deshalb wird in solchen Fällen die harmonisierte Hydrokarbon-Kurve verwendet. Die folgende Gleichung gibt die Entwicklung der Gastemperatur an

$$T = 1080 \cdot \left[1 - 0,325 \cdot e^{(-0,167 \cdot t)} - 0,675 \cdot e^{(-2,5 \cdot t)} \right] \quad \text{Gl. (4.2)}$$

Darin sind:

T Gastemperaturerhöhung [°C]
t Zeit [min]

4.3.3.3 Schwelfeuerkurve

Die Schwelfeuerkurve repräsentiert die Brandentwicklungsphase bei einem Naturbrand bzw. einen langsam ablaufenden Schwelbrand

$$T = 154 \cdot (t)^{0,25} \quad \text{Gl. (4.3)}$$

Darin sind:

T Gastemperaturerhöhung [°K]

t Zeit [min]

4.3.3.4 Externe Brandkurve

Nach Eurocode ENV 1991-2-2 kann für die Bemessung von außerhalb des Brandabschnittes gelegenen Bauteilen innerhalb der jeweiligen nationalen Anwendungsbereiche die folgende Temperatur-Zeit-Kurve angesetzt werden.

$$T = 660 \cdot \left(1 - 0,687 \cdot e^{(-0,32 \cdot t)} - 0,313 \cdot e^{(-3,8 \cdot t)} \right) \quad \text{Gl. (4.4)}$$

Darin sind:

T Gastemperaturerhöhung [°K]

t Zeit [min]

4.3.3.5 RABT Kurve (Tunnelbrandkurve)

Für die Auslegung der Bauteile in Tunneln wird als Design – Fire die sogenannte RABT Kurve angesetzt. Diese Kurve ist eine konservative Hydrokarbon-Kurve die eine Temperatur von 1200 °C innerhalb von 5 Minuten nach Brandbeginn im Tunnel unterstellt, auf dieser Temperatur bis zum Einsetzen von Löschmaßnahmen bleibt und danach in einem Zeitraum von 110 min wieder auf die Ausgangstemperatur absinkt. Abgewandelte Kurven in dieser Art finden sich auch in anderen europäischen Ländern wie bspw. in den Niederlanden, hier wird sogar eine maximale Temperatur von 1350 °C unterstellt.

Die Vorfälle in jüngster Vergangenheit zeigen, dass solche Belastungen wie sie durch Tunnelbrandkurven dargestellt werden in der Realität auftreten können. Es darf jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass bspw. bei Bauteilen ein Schutz vor solchen Temperaturen kaum mehr möglich ist. Weiters ist auch der Abfall der RABT Kurve durch Löschmaßnahmen etwas realitätsfremd, da in der Regel ein Löschangriff unter solchen Umständen nicht möglich ist.

4.3.3.6 Anwendung der nominellen Temperatur-Zeit-Kurve im brandschutztechnischen Design

Die Temperatur-Zeit-Kurven dienen in der Regel zur brandschutztechnischen Bemessungen von Bauteilen. Die sich aus diesen Belastungen ergebenden Bauteiltemperaturen dienen zum Nachweis der Standsicherheit bzw. zur Klassifizierung entsprechend den Bemessungskriterien.

Die Abbildung 4.2 zeigt die normierten nominellen Temperatur-Zeit-Kurven im Vergleich zu einem willkürlich ausgewählten experimentellen Messergebnis eines realen Zimmerbrandes. Im Vergleich zu den tatsächlich gemessenen Temperaturen liegen die meisten normierten Temperaturen deutlich über den real aufgetretenen Temperaturen. Deutlich sind auch die verschiedenen Ansätze der nominellen Temperatur-Zeit-Kurven in Bezug auf die Darstellung verschiedener Brandphasen zu erkennen. Der Bereich der Brandentstehung wird lediglich von der Schwelfeuerkurve einigermaßen zuverlässig wiedergegeben.

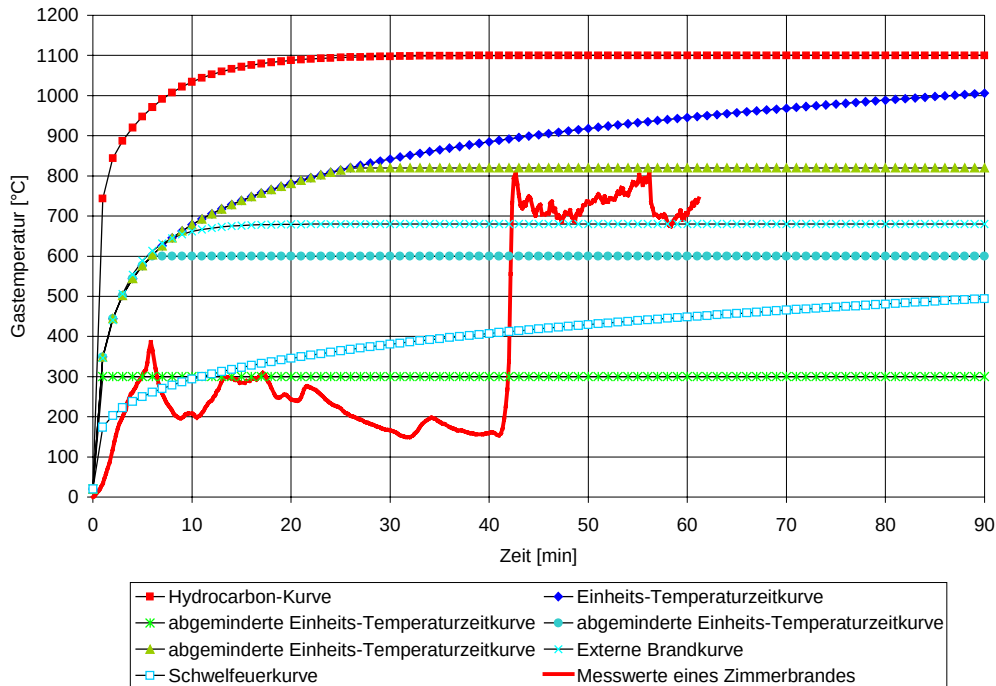


Abbildung 4.2: Normierte nominelle Temperatur-Zeit-Kurven nach GD und ENV 1991 im Vergleich zu einer experimentell ermittelten Temperatur bei einem Zimmerbrand

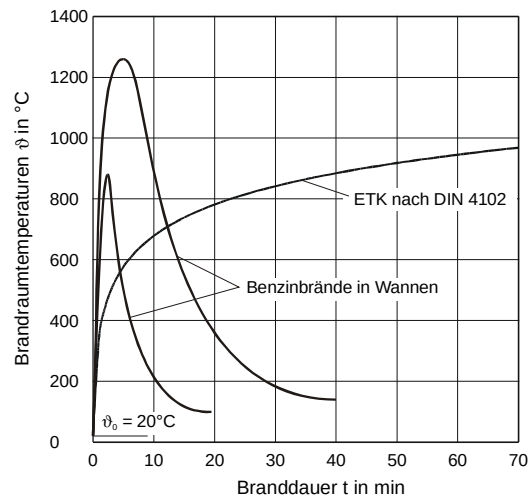


Abbildung 4.3: Temperatur-Zeit-Verläufe bei Benzinbränden im Vergleich zur Einheits-temperaturkurve (ETK) nach DIN 4102

Bei der Anwendung solcher normierter Temperatur-Zeit-Kurven im Brandschutzdesign ist immer auf die Art der möglichen Brände in dem betrachteten Brandbereich zu achten (also auf das Bemessungsbrandszenarium). Die Abbildung 4.3 zeigt einen Vergleich von gemessenen Temperaturen bei Benzinbränden im Vergleich zur ETK. Die Auswahl der der Bemessung zugrundegelegten Temperatur-Zeit-Kurven ist somit in hohem Maße von der Art der Brände abhängig. Brandschutztechnisch relevante Aussagen über Verrauchung können auf der Grundlage von Temperatur-Zeit-Kurven nicht gewonnen werden.

4.3.4 Design Fire beruhend auf Brandleistungskurven

Eine andere Art von Design Fires beruht auf der Angabe einer konstanten Brandleistung oder einer zeitlich abhängigen Freisetzung von Energie im betrachteten Szenarium.

Diese Art der Bemessungsbrände können normiert sein, beispielsweise zur Bemessung von RWAs. Weiters können zeitlich abhängige Brandleistungs - Kurven auch aus Experimenten oder durch ingenieurmäßige Ansätze aus den vorhandenen brennbaren Stoffen abgeleitet werden. Dieser Sonderfall des ingenieurmäßigen Ansatzes wird in einem eigenen Abschnitt behandelt.

Zur Verwendung von normativen Brandleistungs – Zeit - Kurven sind in der Regel Angaben über die Brandfläche, der Brandentwicklungsdauer und je nach Fragestellung auch Angaben über die Brandlast notwendig und sinnvoll.

Grundsätzlich lassen sich die folgenden Fälle unterscheiden:

- Konstante Brandleistung,
- Zeitlich abhängige Brandleistungs - Kurven,
- Brandleistungs -Kurven aus experimentellen Daten.

4.3.4.1 Konstante Brandleistung

Zeitunabhängige konstante Design Fires beschreiben den Steady - State Fall, bei dem davon ausgegangen wird, dass der Brand innerhalb eines definierten zeitlichen Rahmens eine maximale Brandleistung erreicht und die danach konstant bleibt. Der Bemessungsbrand wird dabei so ausgelegt, dass es das größtmögliche zu erwartende Bemessungsbrandszenarium abdeckt, so dass für alle anderen kleineren Brände ausreichende Sicherheit gewährleistet ist. Zeitunabhängige konstante Design Fires beinhalten Angaben zur maximalen Brandleistung, Brandfläche usw. und kommen u.a. zur Anwendung in der

- Norm DIN 18 232-2 und DIN 18 232-5 bzw.
- Technischen Richtlinie TRVB S 125/97

In den oben genannten Bemessungsverfahren werden zwei verschiedene Angaben angegeben:

- Angabe einer flächenspezifischen Brandleistung in kW/m^2 oder kJ/hm^2 und einer Brandfläche.
- Angabe einer Brandleistung unabhängig von der zugrundeliegenden Brandfläche.

Die letztere Angabe ist zum Einsatz in einem brandschutztechnischen Design relativ unbrauchbar. Andererseits können solche Angaben (die beispielsweise aus schlecht dokumentierten Experimenten stammen) zur Überprüfung von ingenieurmäßig entwickelten Design Fires dienen.

4.3.4.1.1 Design Fires zur Bemessung von NAs und MAs nach DIN 18 232-2 bzw. DIN 18 232-5

Den Regelungen in DIN 18232 liegen konkrete Vorstellungen über die zu erwartenden Brandverläufe zugrunde. In Tabelle 4.2 sind die Parameter zusammengestellt, die u.a. zur Erarbeitung der Tabelle 2 in DIN 18232-2 verwendet wurden. Die Bemessungsgruppen wurden aus der zu erwartenden Brandausbreitungsgeschwindigkeit (besonders gering, mittel und besonders groß) und der erwarteten Brandentwicklungsdauer, die von der Branderkennungszeit und der Zeitdauer bis zur Einleitung des Löschangriffs durch die Feuerwehr ermittelt. Dabei wird unterstellt, dass dieser Zeitraum gleichgesetzt wird mit dem Zeitraum, ab dem eine weitere Brandausbreitung nicht mehr stattfindet!

Den Bemessungsgruppen entsprechen nach diesen Vorstellungen den in Tabelle 4.2 angegebenen Brandflächen, für die die Seitenlängen bei quadratischer Ausbreitung sowie der Durchmesser und der Umfang bei kreisförmiger Ausbreitung angegeben sind. Auf dieser Brandfläche verbrennt das Brandgut mit einer spezifischen Brandleistung von 300 kW/m^2 , von der angenommen wird, dass 20 % durch Strahlung im Bereich des Feuerplume abgegeben und 80 % konvektiv in die Heißgasschicht eingetragen wird.

Für die Ermittlung der erforderlichen Leistungen von mechanischen Rauchabzugsanlagen werden im vorliegenden Entwurf des Teiles 5 der DIN 18232 die gleichen Brandflächen den einzelnen Bemessungsgruppen zugeordnet. Allerdings wird in diesem Fall von einer Brandleistung von 600 kW/m^2 ausgegangen, was zu den in Tabelle 4.2 auf den beiden unteren Zeilen angegebenen Energiefreisetzungen führt.

Die unterschiedlichen Brandleistungen auf den Brandflächen in DIN 18232 Teil 2 und Teil 5 werden damit begründet, dass die ungünstigste Wirkung von Rauchabzugsanlagen mit natürlicher Ventilation bei geringen Brandleistungen und damit verbundenen niedrigen Rauchgastemperaturen und geringerem thermischem Auftrieb eintreten, während bei mechanischen Rauchabzugsanlagen der ungünstigste Rauchabzug bei hohen Brandleistungen und damit verbundenen hohen Rauchgastemperaturen mit geringer Dichte und geringen Förderleistungen der mechanischen Rauchabzugsanlagen anzunehmen ist. Die Förderleistung in m^3/h bleibt annähernd konstant, während der abgeführte Rauchgasmassenstrom in kg/s mit zunehmender Temperatur geringer wird. Dieses Argument ist wenig stichhaltig, weil ja gerade der Rauchabzug in der Phase der Brandentstehung greifen soll. 600 kW/m^2 liegt bereits an der unteren Grenze eines Flüssigkeitsbrandes. Für eine Bemessung des Rauchabzugs zur Sicherstellung des Personenschutzes sind die getroffenen Annahmen in DIN 18 232 Teil 5 entschieden zu hoch.

Tabelle 4.2: Bemessungsbrände für die Festlegungen in DIN 18232 Teil 2 und Teil 5

Annahmen DIN 18232	Einheit	Bemessungsgruppe						
		1	2	3	4	5	6	7
Flächen	m ²	5	10	20	40	80	160	320
Seitenlänge	m	2,236	3,162	4,472	6,325	8,944	12,649	17,889
Durchmesser	m	2,523	3,568	5,046	7,136	10,093	14,273	20,185
Umfang	m	7,927	11,210	15,853	22,420	31,707	44,840	63,413
Brandleistung nach Teil 2	kW	1500	3000	6000	12000	24000	48000	96000
konvektiver Anteil nach Teil 2	kW	1200	2400	4800	9600	19200	38400	76800
Brandleistung nach Teil 5	kW	3000	6000	12000	24000	48000	96000	192000
konvektiver Anteil nach Teil 5	kW	2400	4800	9600	19200	38400	76800	153600

Die DIN 18 232-2 legt 7 und die DIN 18 232-5 setzt 5 Bemessungsgruppen für Rauchabzüge fest. Sie werden über die zu erwartenden Brandausbreitungsgeschwindigkeit und die zu erwartenden Brandentwicklungsdauer bestimmt. Die Berechnungen für die Werte der Brandausbreitungsgeschwindigkeit beruhen dabei auf der Annahme, dass die jeweils angegebenen Brandentwicklungsdauer (aus Spalte 2 der Tabelle 4.4) mit dem Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Brandfläche identisch ist. Daraus ergeben sich für eine flächige Brandausbreitung folgende Mittelwerte (siehe Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Gemittelte Brandausbreitungsgeschwindigkeit nach DIN 18232, Teil 2 und 5

Brandausbreitungsgeschwindigkeit	[m/min]
besonders klein	0,15
mittel	0,25
besonders groß	0,45

Bei der Brandentwicklungsdauer handelt es sich um jene Zeitspanne zwischen dem Moment der Brandentstehung und dem Beginn wirksamer Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr. Die Zeit von der Brandentwicklung bis zur Branderkennung bleibt dabei unberücksichtigt, da für die Bemessung unterstellt wird, dass eine automatische Brandmeldeanlage mit Rauchmeldern vorhanden sein muss (bzw. ständig anwesendes, geschultes Personal). Gleichzeitig wird angenommen, dass ab dem Eintreffen der Feuerwehr am Brandort keine weitere Brandausbreitung mehr stattfindet. Diese Annahme ist relativ günstig.

Tabelle 4.4: Festlegungen zur Brandentwicklungsdauer nach DIN 18232, Teil 2 und Teil 5

Verhältnisse	Brandentwicklungsdauer [min]
Bei einer Werkfeuerwehr oder Vorhandensein einer Sprinkleranlage	≤ 5 min
Für Anfahrt und Einleitung des Löschangriffs durch die Feuerwehr	≤ 10 min
Bei ungünstigen Verhältnissen	≤ 15 min
Bei besonders ungünstigen Verhältnissen	≤ 20 min

Den Bemessungsgruppen entsprechen gemäß dieser Regelungen die in Tabelle 4.5 angeführten maximalen Brandflächen. 20 % dieser spezifischen Brandleistungen wird dabei durch Strahlung im Bereich des Flammenherdes („plume“) abgegeben. Die restlichen 80 % werden konvektiv in die Rauchgasschicht eingebracht. Die Brandausbreitung erfolgt radial, d.h. die rechnerische Brandfläche A_B ist kreisförmig.

Tabelle 4.5: Bemessungsgruppen nach DIN 18 232, Teil 5 [7]

Bemessungs-Gruppe (BG)	BG 1	BG 2	BG 3	BG 4	BG 5
max. Brandfläche [m ²]	5	10	20	40	80
Brandherdradius [m]	1,262	1,784	2,523	3,568	5,046
Brandherddurchmesser [m]	2,52	3,57	5,05	7,14	10,09
Brandherdumfang [m]	7,93	11,21	15,85	22,42	31,71

Aus Tabelle 1, Seite 6 der DIN 18 232-5 lassen sich nun insgesamt 11 Bemessungsbrände ableiten. Sie werden jeweils durch eine Brandfläche und die zugehörige Brandleistung, einer Brandausbreitungsgeschwindigkeit und der Brandentwicklungsdauer bestimmt (siehe Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Bemessungsbrände nach DIN 18 232, Teil 5

Szenarium	Bemessungs- gruppe BG	Brandfläche [m ²]	Brandleis- tung [kW]	Brandausbrei- tungs- geschwindigkeit [m/min]	Brandentwick- lungs-dauer [min]
Szenario 1:	1	5	3000	0,15	5
Szenario 2:	2	10	6000	0,15	10
Szenario 3:	2	10	6000	0,25	5
Szenario 4:	3	20	12000	0,15	15
Szenario 5:	3	20	12000	0,25	10
Szenario 6:	3	20	12000	0,45	5
Szenario 7:	4	40	24000	0,15	20
Szenario 8:	4	40	24000	0,25	15
Szenario 9:	4	40	24000	0,45	10
Szenario 10:	5	80	48000	0,25	20
Szenario 11:	5	80	48000	0,45	15

Die maximale Brandleistung in Szenario 10 und 11 beträgt somit fast 50 MW. Dies entspricht der Energiefreisetzung eines kleinen Großbrandes! Für übliche Bemessungsfälle in Atrien, Bahnhöfen und Einkaufspassagen werden im internationalen Bereich in allgemeinen 5 MW-Feuer als „design-fire“ verwendet (siehe Tabelle 4.7). Das sind nur 10 % des in der DIN 18 232-5 angeführten Größtwertes. Diesem Wert nähern sich nur die ersten 3 Bemessungsbrände der Norm. Die übrigen Szenarien übersteigen diesen Richtwert um 240, 480 bzw. 960 %! Es ist somit fraglich, ob dieser Norm-Entwurf im internationalen Vergleich überhaupt wirtschaftlich vertretbar ist.

Tabelle 4.7 : Brandszenarien nach CEN

Gebäude, Räume	Brandfläche [m ²]	Brandumfang [m]	Brandleistung [kW]
Verkaufsflächen mit			
• Normalsprinkler	10	12	6250
• Fast Response Sprinkler	5	9	3125
Büros			
• Normalsprinkler	16	14	3600
• ohne Sprinkler	47	24	10575
Hotelzimmer mit			
• Normalsprinkler	2	6	500
Großgarage	10	12	4000

4.3.4.1.2 Design Fires zur Bemessung von RWAs nach TRVB S125

Die TRVB S 125 (Technische Richtlinien für den vorbeugenden Brandschutz) sind Richtlinien die vom Österreichischen Feuerwehrverband herausgegeben werden. Diese TRVB beschreibt ein Verfahren zur Dimensionierung von Brandrauchabsauganlagen und Brandrauchentlüftungen auf der Basis eines ingenieurmäßigen Verfahrens.

Ausgangspunkt für alle Berechnungen in dieser Richtlinie sind Bemessungsbrände. Sie werden entweder aufgrund praktischer Erfahrungen (Experimenten) ermittelt oder aus der einschlägigen Fachliteratur entnommen, z.B. über die einer Nutzungsart zugeordnete Bemessungsgruppe aus TRVB A 126 [32].

Falls keine gesicherten Daten oder Ergebnisse realer Brandversuche vorliegen, können aus dem Anhang 7 der TRVB S 125 [36] vorgegebene Bemessungsbrände für verschiedene Nutzungen übernommen werden.

Die Richtlinie legt der Bemessung vier Gruppen zugrunde, die sich jeweils auf

- eine Bemessungsbrandfläche (A_B)
- einen zugehörigen Bemessungsbrandumfang (U_B)
- eine durch den Brand freigesetzte spezifische Brandleistung (q_B)

beziehen (s. Tabelle 4.8).

Tabelle 4.8: Bemessungsbrände nach der technischen Richtlinie TRVB S 125 [36]

BRE-Gruppe lt. TRVB A 126	Bemessungs- brandumfang U_B [m]	Bemessungs- brandfläche A_B [m²]	Spezifische Brandleistung 1 q_B [kW/m²]	Spezifischer Brandleistung 2 q_B [kW/m²]
BRE-Gr. 1	12	10	156	78
BRE-Gr. 2	18	20	312	156
BRE-Gr. 3	25	40	625	312
BRE-Gr. 4	36	80	1250	625

Die Rechenwerte der spezifischen Brandleistung 1 gelten ausschließlich zur Bemessung einer maschinellen RWA (MA), der spezifischen Brandleistung 2 zur Berechnung einer natürlichen Brandrauchentlüftungsanlage (NA).

Ein weiterer wichtiger Einflußfaktor ist die Nutzungsart eines Gebäudes. In Abhängigkeit von der Nutzung des Brandraumes ergeben sich verschiedene

- Brandbelastungen
- Brandlastverteilungen und
- unterschiedliche Brandausbreitungsgeschwindigkeiten.

Die Richtlinie verweist in diesem Zusammenhang auf die TRVB A 126 Tabelle 2 Spalte 11 [3], wo jeder speziellen Nutzung eine der vier BRE-Gruppen zugeordnet wird (siehe Tabelle 4.9):

Tabelle 4.9: Auszug aus Tab. 2 der Technischen Richtlinie TRVB A 126 (Brandschutztechnische Kennzahlen verschiedener Nutzungen, Lagerungen, Lagergüter) [32]

Nutzung als Betrieb (beinhaltet Herstellung)	Mobile Brandbelastung [MJ/m²]	BRE-Gruppe bzw. BRA-Gruppe
Eisenwarengeschäft	300	1
Apotheke (inkl. Lager)	800	2
Auto, Reparaturwerkstätte	300	3
Chem. Reinigung	300	4
Dachpappe	2000	4

Weiters legt die TRVB S 125 fest, dass die Bemessungsbrandfläche (A_B)

- bei Vorhandensein einer Brandmeldeanlage (BMA) um eine BRE-Gruppe
- bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage um zwei BRE-Gruppen

herabgesetzt werden kann. Es muss jedoch mit der Brandleistung der tatsächlichen Nutzung gerechnet werden! Die Grundlage hierfür ist die Annahme, dass im Brandfall mit einer Branddetektion durch eine BMA die Brandleistung zwar dieselbe bleibt, weil dieselben Stoffe verbrennen, die Brandfläche aber um die Hälfte kleiner wird, da der Löschvorgang durch eine rechtzeitige Meldung des Brandes früher eingeleitet werden kann.

Bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage wird sogar nur mit einem Viertel der Brandfläche der eigentlichen BRE-Gruppe gerechnet, weil davon ausgegangen wird, dass durch zum

Brandherd richtig positionierte Sprinkler die Brandfläche auf ein Viertel eingedämmt werden kann. Aus den eben angeführten Grundlagen ergeben sich 9 mögliche Bemessungsbrände für die Bemessung einer BRA-Anlage:

Tabelle 4.10: Bemessungsbrände nach TRVB S 125 für die Bemessung einer maschinellen Entrauchung

Design Fire	BRE-Gruppe	Bemessungs- brandumfang	Bemessungs- brandfläche	Spezifische Brandleistung
		U_B [m]	A_B [m ²]	q_B [kW/m ²]
Design Fire 1:	1	12	10	156
Design Fire 2:	2 + BMA	12	10	312
Design Fire 3:	2	18	20	312
Design Fire 4:	3 + Sp.	12	10	625
Design Fire 5:	3 + BMA	18	20	625
Design Fire 6:	3	25	40	625
Design Fire 7:	4 + Sp.	18	20	1250
Design Fire 8:	4 + BMA	25	40	1250
Design Fire 9:	4	36	80	1250

BMA Brandmeldeanlage vorhanden

Sp. Sprinkleranlage vorhanden

4.3.4.2 Zeitlich abhängige Brandleistungs-Kurven (Heat-Release-Curves)

Zeitlich abhängige Brandleistungs - Kurven die gegebenenfalls auch abhängig von der Art der Brandlast sind, lassen sich aus Angaben über die Brandentwicklungsphase realisieren. Der durch eine konstante Energiefreisetzung beschriebene Zustand eines Brandes (steady - state) wird in der Realität, wenn überhaupt, erst nach einer bestimmten Zeit erreicht. Der Zeitraum der bis zum Erreichen eines solchen Zustandes verstreicht, ist bei normierten Brandleistungen über die zugrundeliegenden Maßnahmen ableitbar. So werden beispielsweise zur Bemessung von RWAs die Bemessungsbrände als solche definiert wie sie beim Einsetzen einer Löschmaßnahme vorliegen. Solche Zeiträume können sein:

- Ansprechen und Einsatz einer Sprinkleranlage
- Ansprechen und Einsatz einer Löschanlage
- Eingriffszeit bis zum Löschangriff einer Feuerwehr

Die wichtigsten Vertreter solcher Brandleistungs - Kurven sind:

- t^2 - Modelle
- Brandausbreitungsmodelle

4.3.4.2.1 t^2 - Modelle

Im Angelsächsischen Raum (USA) werden in der Praxis die Brandausbreitung und die Brandleistungs - Kurven häufig anhand einfacher t^2 - Modelle beschrieben. Nach NFPA wird folgende Beziehung vorgeschlagen:

$$Q_c = \alpha \cdot (t - t_i)^2 \quad \text{Gl. (4.1)}$$

Darin sind:

- Q_c Brandleistung in kW
- t_i Zeit bis zur Entzündung in s
- t Zeit in s
- α Ausbreitungsfaktor in kJ/s^3 .

In der nachstehenden Tabelle 4.11 sind die entsprechenden α -Werte in Abhängigkeit von den im NFPA Standard genannten Stoffen angegeben.

Tabelle 4.11: Flammenausbreitungsparameter für das quadratische Ausbreitungsmodell gemäß NFPA

Stoffgruppen	Flammenausbreitung	α [kJ/s^3]	Zeitdauer in [s] für $Q_c=10^3$ kW
keine Angabe	langsam	0.0029	587
Baumwolle lose, Polyestermatratze	mittel	0.0117	252
Kunststoffschaum, gestapelte Holzplatten, gefüllte Postsäcke	schnell	0.0469	146
Methylalkohol, schnellbrennende Polstermöbel	sehr schnell	0.1876	73

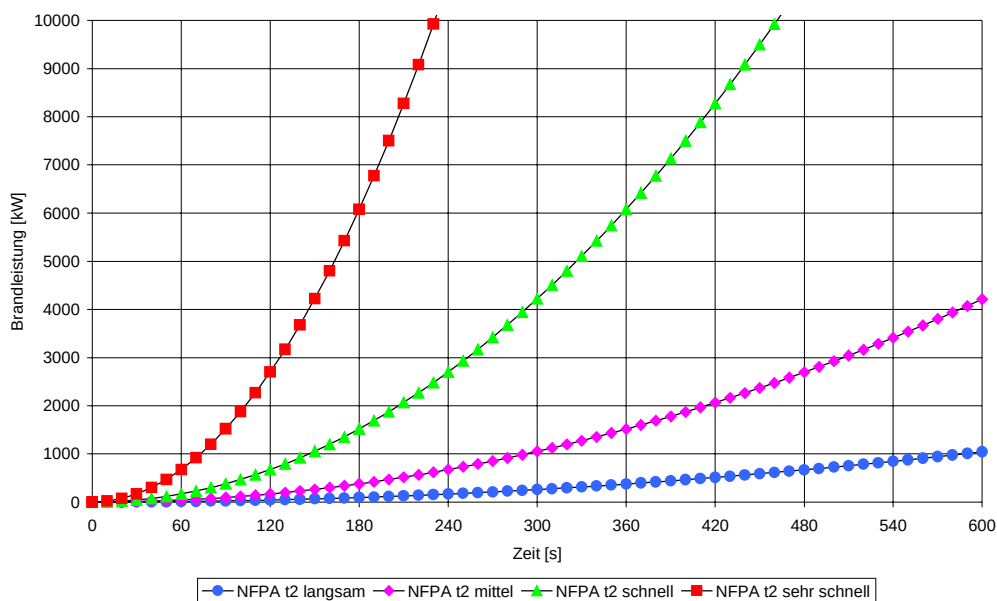


Abbildung 4.4: Darstellung der t^2 - Modelle nach NFPA

4.3.4.2.2 Brandausbreitungsmodell nach MRFC

Allgemein lässt sich die quadratische Ausbreitung eines Brandes durch das im Brandsimulationsprogramm MRFC [12] beschriebene Brandausbreitungsmodell genauer beschreiben. Für eine von der Zeit abhängige quadratische Brandfläche A_f gilt bei konstanter Brandausbreitungsgeschwindigkeit v in zwei Richtungen:

$$A_f = (v \cdot (t - t_i))^2 \quad \text{Gl. (4.2)}$$

Darin sind:

A_f	Brandfläche in m^2
v	Brandausbreitung nach der Entzündung in x - und y Richtung in m/s
t_i	Zeit bis zur Entzündung in s
t	Zeit in s .

Die Brandleistung auf dieser Brandfläche bei vollständiger Verbrennung ist:

$$Q_C = \dot{r} \cdot H_u \cdot A_f \quad \text{Gl. (4.3)}$$

Darin sind:

$\dot{r}$	spez. Abbrandgeschwindigkeit in $\text{kg/m}^2 \text{ h}$
H_u	Heizwert in kWh/kg .

Ein Vergleich der Faktoren in den Gleichungen Gl. (4.2) und Gl. (4.3) zeigt, dass die folgende Beziehung gilt:

$$v = \left(\frac{\alpha}{\dot{r} \cdot H_u} \right)^{1/2} \quad \text{Gl. (4.4)}$$

Mit den spezifischen mittleren Brandleistungen von 100 kWh/m^2 , 300 kWh/m^2 und 800 kWh/m^2 für die in Tabelle 3.6.3 nach NFPA angegebenen Stoffgruppen errechnen sich aus Gl. (4.2) Feuerausbreitungsgeschwindigkeiten von etwa 10 mm/s , 12.5 mm/s und 15 mm/s , d. h. im NFPA-Modell wird die Brandausbreitungsgeschwindigkeit der einzelnen Stoffe nur sehr wenig bzw. gar nicht berücksichtigt. Das NFPA-Modell hebt somit vor allem auf die spezifischen Brandleistungen ab.

Nach den vorliegenden Erfahrungen ist die nach NFPA angegebene Spannweite für Brandausbreitungsgeschwindigkeiten zu gering! Der für Methylalkohol und schnellbrennende Polyestermöbel genannte Wert von 15 mm/s ist bei einem fortentwickelten Brand mit Sicherheit falsch. In Tabelle 4.12 sind diesbezüglich neuere Werte genannt.

Im Rahmen von Brandschutzberechnungen bzw. Brandsimulationen hat sich die Anwendung des in [12] beschriebenen Modells gemäß den Gleichungen Gl. (4.2) und Gl. (4.3) bewährt. Die praktisch anzunehmenden Werte für die Brandausbreitung sind in Tabelle 4.13 zusammengestellt. Für den Industriebereich haben sich Werte von 5 bis 15 mm/s bewährt. Bei Großbränden (z. B. Brand der Fordwerke in Köln) wurden anhand der Auslösung von Sprinklergruppen mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeiten von rund 15 mm/s beobachtet.

Tabelle 4.12: Brandausbreitung bei festen Stoffen nach [20]

Brennbare Stoffe/Objekte	Mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeiten in mm/s
Bauten mit Holzkonstruktionen, Möbel usw.	16-20
Gummierzeugnisse in Stapeln auf offener Fläche	18
Bretterstapel	33
Rundholzstapel	3,8-12
Kautschuk in geschlossenem Lager	6,6
Strohdach (trocken)	40,0
Papier in Rollen	4,5
Textilerzeugnisse in geschlossenem Lager	5,5
Torf in Stapeln	16
Decken aus B2 Baustoffen bei Werkhallen	28-53

Tabelle 4.13: Brandausbreitungsgeschwindigkeit für geometrische Ausbreitungsmodelle nach Gl. (4.6.3)

Brandausbreitung	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in mm/s	
	nach [37]	nach DIN 18232 [33]
Entstehungsphase	1-2	-
langsam	5	2,5
mittel	8	4,0
schnell	12-20	7,5
sehr schnell	30-50	-
Flashover	80-120	-

Die für DIN 18 232 angegebenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind aus den in der Norm angegebenen Brandentwicklungsdauern und den zugrundegelegten Brandflächen, die in der Norm nicht explizit genannt sind, rechnerisch ermittelt worden (siehe Lit. [33]).

4.3.5 Brandleistungs - Kurven aus experimentellen Daten

Die Modellierung der "heat source", d.h. des Feuers selbst, stellt die größte Hürde beim Einsatz von ingenieurmäßigen Methoden für das Brandschutzdesign dar. Werden Brandexperimente in einem Kalorimeter durchgeführt, können aus den Einzelversuchen Brandleistungs - Kurven bestimmt werden, die repräsentativ für das untersuchte Bemessungsbrandszenarium sind. Bei der Verwendung von "Heat Release Curves" aus Experimenten ist besonders auf die Übertragbarkeit der Versuchswerte auf das vorliegende Problem zu achten.

Im Folgenden werden experimentell ermittelte Brandleistungs – Kurven nach [38] gezeigt, die für verschiedene Bemessungsbrandszenarien angesetzt werden können. Bei der Anwendung solcher Kurven ist jedoch darauf zu achten, dass die Brände Einzelbrände von Objekten in einem relativ großen Raum darstellen. Aussagen über Brandausbreitung auf andere brennbare Objekte oder ein etwaiger Einfluss von Geometrie oder Lüftung sind auf der Basis solcher Kurven ohne weitergehende ingenieurmäßige Überlegungen nicht möglich.

Die

Abbildung 4.5 zeigt Brandleistungs – Kurven wie sie beim Brand von Objekten in Wohnnutzungen auftreten können. Für gewerbliche Nutzung sind experimentell ermittelte Brandleistungs – Kurven in Abbildung 4.6 dargestellt. Solche Kurven können als Anhaltswerte bei der Entwicklung eines Design Fires für ein bestimmtes Bemessungsbrandszenarium dienen.

In der Tabelle 4.14 und Tabelle 4.15 sind für die dargestellten Brandleistungs – Kurven Bilder von verschiedenen Schlüsselpunkten in den Experimenten dargestellt.

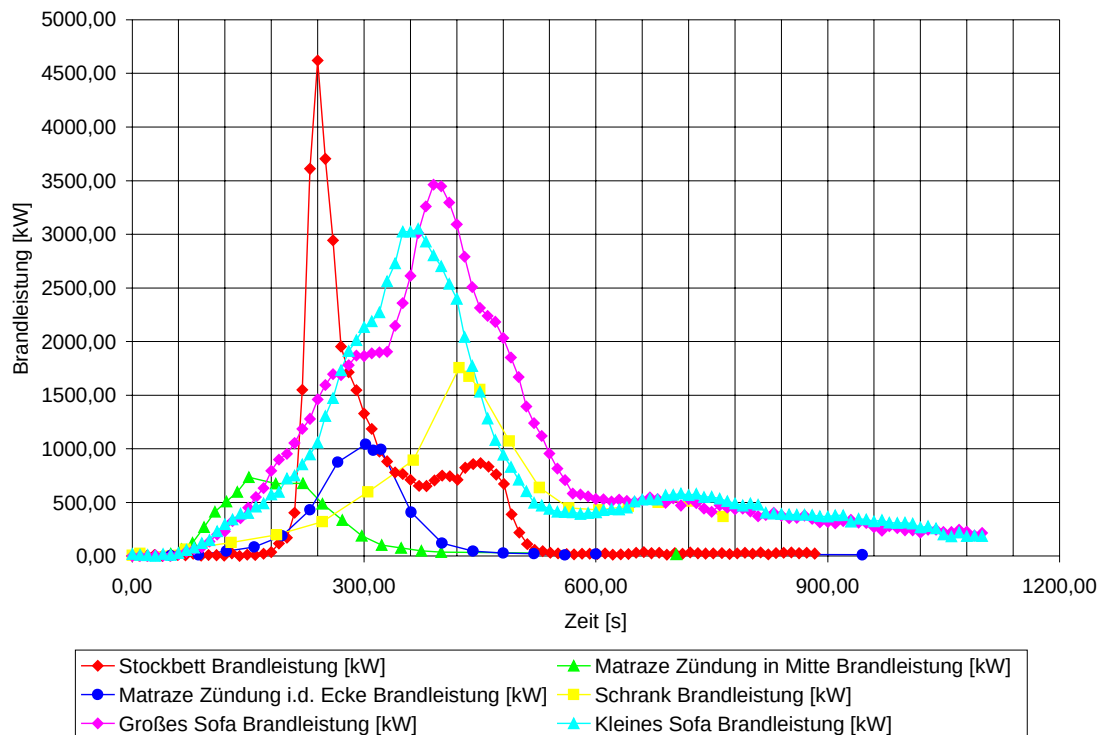


Abbildung 4.5: Experimentelle Brandleistungs – Kurven für brennende Objekte in Wohnnutzungen nach [38]

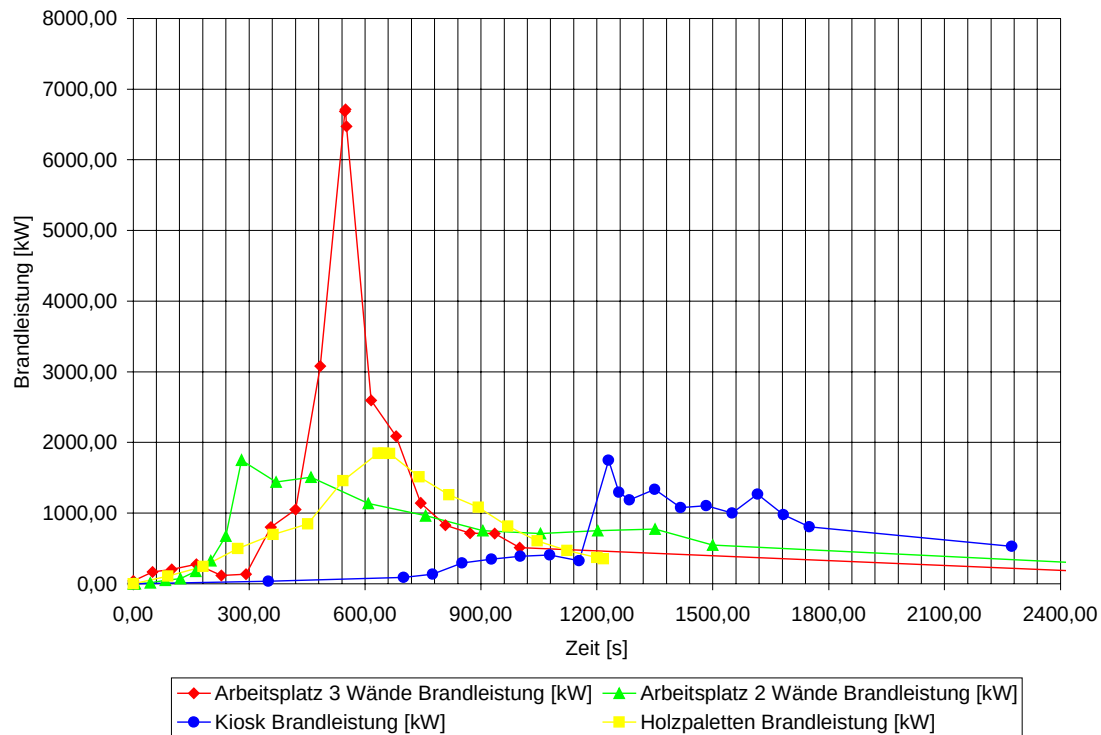


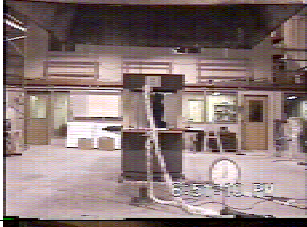
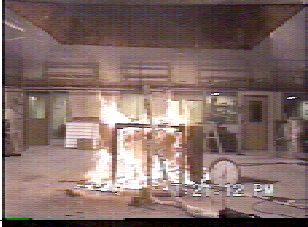
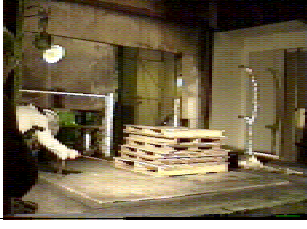
Abbildung 4.6: Experimentelle Brandleistungen – Kurven für brennende Objekte in gewerblichen Nutzungen nach [38]

Tabelle 4.14: Visuelle Darstellung von Schlüsselpunkten in den experimentellen Brandleistungen – Kurven für brennende Objekte in Wohnnutzungen nach [38]

Versuch	Brandbeginn	Brandspitze	Brandende
Stockbett			
Matratze Zündung in Mitte			
Matratze Zündung in Ecke			

Schrank			
Großes Sofa			
Kleines Sofa			

Tabelle 4.15: Visuelle Darstellung von Schlüsselpunkten in den experimentellen Brandleistungen – Kurven für brennende Objekte in gewerblichen Objekten nach [38]

Versuch	Brandbeginn	Brandspitze	Brandende
Arbeitsplatz mit drei Wänden			
Arbeitsplatz mit zwei Wänden			
Kiosk			
Holzpaletten			

4.3.6 Parametrische Design Fires

Die parametrischen Design Fires berücksichtigen die Ventilationsverhältnisse, die thermischen Eigenschaften der Wandbauteile und die Brandlast in einem betrachteten Szenarium. Sie werden nicht normativ angegeben sondern anhand einer Funktion beschrieben, die auf bestimmte Randbedingungen abhebt. Solche Randbedingungen können sein:

- Raumgröße (Brandabschnittsgröße)
- Ventilationsbedingungen
- Art der umgebenden Bauteile
- Art der Brandlast

Diese Design Fires beschreiben im allgemeinen Brände die ventilationsgesteuert ablaufen, d.h. dass die Brandleistung im betrachteten Brandraum maßgeblich durch die Menge an einströmender Luft durch die vertikalen Öffnungen bestimmt wird. In der Regel berücksichtigen parametrische Design Fires keine horizontalen Öffnungen, sie sind bei Vorhandensein von horizontalen Öffnungen somit nicht anwendbar.

Parametrische Design Fires wurden anhand von Experimenten und daraus abgeleiteten Berechnungsmodellen (Vollbrandmodelle) für relativ kleine Geometrien entwickelt und wurden auch als Bemessungsannahmen in die Eurocodes eingeführt. Die in den Eurocodes angegebenen parametrischen Temperatur – Zeit – Kurven sind nach unserer Kenntnis experimentell nicht überprüft worden.

4.3.6.1 Parametrische Temperaturzeitkurve nach ENV 1991-2-2, Anhang B

Die Temperaturzeitkurven dürfen gemäß dem jeweiligen nationalen Anwendungsbereich angewendet werden. Sie gelten aber nur für Brandabschnitte bis zu einer Bodenfläche von 100 m² ohne Dachöffnung und einer Höhe von maximal 4 m. Sie basieren und sollen auch nur angewendet werden für Brandabschnitte mit überwiegend Zellulose-Brandlasten.

Die Berechnung der Temperaturkurve erfolgt wie folgt:

Berechnung eines Öffnungsfaktor O:

$$O = \frac{A_v \cdot \sqrt{h}}{A_t} \quad \text{Gl. (4.5)}$$

Darin sind:

O	Öffnungsfaktor [m ^{0,5}]
A _v	Fläche der vertikalen Öffnung
A _t	Gesamtfläche der Böden, Wände und Decke einschließlich der Öffnungen [m ²]
h	Höhe der vertikalen Öffnung [m]

Der Öffnungsfaktor O muss sich innerhalb folgender Grenzen bewegen:

$$0,02 \leq O \leq 0,20$$

Berechnung der Wärmeeindringzahl b zur Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften der umgebenden Bauteile:

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \quad \text{Gl. (4.6)}$$

Zur Anwendung muss der Wert b innerhalb folgender Grenzen liegen

$$1000 \leq b \leq 2000$$

Darin sind:

- b Faktor [$\text{J/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5} \cdot \text{K}$]
- ρ Dichte der raumabschließenden Bauteile [kg/m^3]
- c Spezifische Wärme der raumabschließenden Bauteile [J/kgK]
- λ Wärmeleitfähigkeit der raumabschließenden Bauteile [J/m.s.K] oder [W/m.K]

Aus den obengenannten Größen wird der Wert Γ wie folgt ermittelt:

$$\Gamma = \frac{(O/b)^2}{(0,04/1160)^2} \quad \text{Gl. (4.7)}$$

Für einen Zeitpunkt t nach Zündung kann nun durch Multiplikation des Wertes Γ mit dem Wert der verstrichenen Zeit t in Stunden eine modifizierte Zeit t^* ermittelt werden:

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad \text{Gl. (4.8)}$$

Aus dem vorherbestimmten Parameter lässt sich nun die Temperaturzeitkurve der Erwärmungsphase ermitteln:

$$\Theta_g = 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{(-0,2 \cdot t^*)} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{(-19 \cdot t^*)}) \quad \text{Gl. (4.9)}$$

Darin ist:

Θ_g die Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt t in $[\text{°C}]$

Die Temperatur – Zeit – Kurven während der Abkühlung werden angegeben durch:

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625 \cdot (t^* - t_d^*) \quad \text{für } t_d^* \leq 0,5 \quad \text{Gl. (4.10)}$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 \cdot (3 - t_d^*) \cdot (t^* - t_d^*) \quad \text{für } 0,5 < t_d^* < 2 \quad \text{Gl. (4.11)}$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 \cdot (t^* - t_d^*) \quad \text{für } t_d^* \geq 2 \quad \text{Gl. (4.12)}$$

Darin sind:

Θ_g die Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt t in $[\text{°C}]$

$\Theta_{\max}$ die maximale Temperatur während der Heizphase in $[\text{°C}]$ für $t^* = t_d^*$

t_d^* repräsentiert eine modifizierte Zeit, die von der Brandbelastung im betrachteten Brandabschnitt abhängt und wie folgt ermittelt wird:

$$t_d^* = \frac{0,13 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} \cdot \Gamma}{O} \quad \text{Gl. (4.13)}$$

Darin sind:

$q_{t,d}$ Bemessungswert der Brandbelastung bezogen auf die Gesamtfläche der Böden, Wände und Decke einschließlich der Öffnungen [MJ/m^2]

Es gelten folgende Grenzen:

$$50 \leq q_{t,d} \leq 1000$$

Ermittelt man nun für verschiedene Baustoffe und Ventilationsverhältnisse die entstehenden Temperatur – Zeit - Kurve so erhält man die folgende Abbildung 4.7:

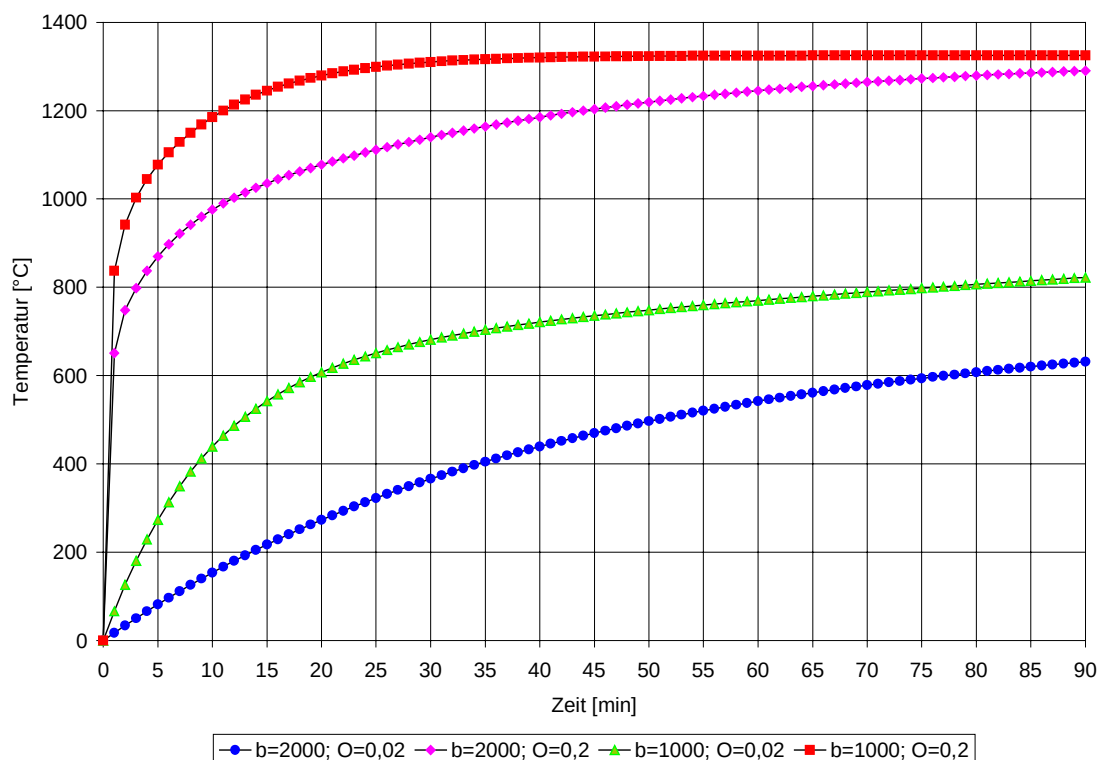


Abbildung 4.7: Parametrische Temperatur – Zeit – Kurven unter Berücksichtigung der Grenzfälle für die Wärmeeindringzahlen $b=1000$ und 2000 und den Öffnungsfaktoren $O = 0,02$ und $0,2$.

Die Abbildung 4.7 zeigt die parametrischen Temperatur – Zeit – Kurven die sich aus den Grenzfällen der Wärmeeindringzahl b und dem Öffnungsfaktor O ergeben. Eine Abkühlphase wird nicht berücksichtigt. Augenscheinlich ist die extreme Temperatur von über 1200°C die bei einer Wärmeeindringzahl b von 1000 und einem Öffnungsfaktor von $0,2$ auftritt. Überträgt man diese Werte auf die Realität entspricht eine Wärmeeindringzahl $b = 1000$ beispielsweise einer Normalbetonwand und der betrachtete Öffnungsfaktor einem Brandraum von 100 m^2 Grundfläche mit ca. 40% geöffneter Seitenwand. Die parametrischen Temperatur – Zeit –

Kurven heben aber auf Brände mit überwiegend Zellulose-Brandlasten ab, somit sind diese hohen Temperaturen von 1200 °C bei der relativ großen Öffnungsfläche absolut unrealistisch.

5 Entwicklung von Design Fires

Der Temperaturverlauf und die Rauchentwicklung im Brandraum werden in erster Linie durch die Art der Brandbelastung, die als flächenbezogene Wärmemenge q sämtlicher in einem Brandabschnitt vorhandenen brennbaren Stoffe in kWh/m² angegeben wird, durch die Ventilation, die z. B. durch einen Öffnungsfaktor definiert werden kann, durch die Brandfläche und durch die Abbrandratesgeschwindigkeit bestimmt. Die Brandlast bezogen auf die Bezugsfläche ergibt sich zu:

$$q = \frac{\sum (M_i \cdot H_{Ui})}{A} \quad \text{Gl. (5.1)}$$

Darin sind:

- q Brandbelastung in kWh/m² oder MJ/m²
- M_i Masse des einzelnen brennbaren Stoffes in kg
- H_{Ui} Heizwert des einzelnen brennbaren Stoffes in kWh/kg bzw. MJ/kg – ermittelt nach DIN 51 900,
- A rechnerische Bezugsfläche bzw. Grundfläche eines Raumes in m².

Sofern es sich um Brandlasten handelt, deren Abbrandverhalten aus Versuchen o. ä. bekannt ist, kann der Temperaturverlauf in einem Raum unter Berücksichtigung der vorstehend erläuterten Größen rechnerisch vorausbestimmt werden (Wärmebilanzrechnung). Dabei können weitere, die örtlichen Gegebenheiten differenzierende Faktoren berücksichtigt werden. Mit ihrer Hilfe können z. B. die Raumform und Ventilation, die Wärmekapazität der umgebenden Bauteile und andere thermische Einflüsse erfasst werden.

Aufgrund neuerer Entwicklungen wird im nationalen Bereich (z. B. gemäß Industriebaurichtlinie bzw. nach DIN 18 230–1 Baulicher Brandschutz im Industriebau) und auch international bereits stark auf Brandschutzbeurteilungen abgehoben, welche auf realen Schadenfeuern basieren. Diesbezüglich liegen umfangreiche Veröffentlichungen und Erfahrungen vor.

Prinzipiell sollten für die Brandschutzbemessung jedoch alle Möglichkeiten offen bleiben, d.h. soweit eine realistische Berechnung des zu erwartenden Schadenfeuer möglich ist, sollte darauf zurückgegriffen werden. Das Bemessungskonzept nach Design Fires ist jedoch von Vorteil, weil es zu einem vergleichsweise einfachen Vorgehen führt. Wichtig ist dabei, dass bei dem unterstellten Feuer die zu erwartenden Temperatur- oder Rauchentwicklungen und eventuell toxischen bzw. korrosiven Gase auf der sicheren Seite liegend berücksichtigt werden. Dabei ist das Zusammenwirken aller Räume im Gebäude zu beachten.

Entsprechend der jeweils vorliegenden Fragestellung sind die Bemessungsbrandszenarien im Rahmen des Brandschutzkonzeptes zu behandeln. Diese liefern für die Risikobetrachtung auf der „sicheren Seite“ liegende Bewertungen. Entscheidend ist dabei das anzunehmende Brandmodell (Abbrandmodell), das für den jeweiligen Einzelfall festzulegen ist und gewissermaßen ein „abdeckendes Schadenfeuer“ simulieren soll.

5.1 Grundlagen der Berechnung des Ablaufes von realen Bränden

Durch die ständige Ausweitung der rechentechnischen Möglichkeiten (EDV) sind im Brandschutzingenieurwesen in jüngster Zeit viele kostengünstige Anwendungen neuartiger Lösungsmethoden entwickelt worden. Die Methoden beziehen sich dabei sowohl auf Detailprobleme als auch auf umfassende Fragestellungen im Brandschutz der folgenden Art:

- theoretische Simulation der Auslösung von Brandmeldern
- Berechnung der Entzündung und Ausbreitung von Feuer
- Berechnung der Flammenstrahlung bei tatsächlichen Schadenfeuern
- Berechnung der Temperatur- und Rauchverteilung in komplexen Gebäuden
- Berechnung der Wirksamkeit von Sprinklern
- Simulation der Evakuierung von Hochhäusern

Alle derzeit verfügbaren EDV-Programme haben im Grundsatz jedoch ein Problem gemeinsam, sie müssen geeignet sein, reale Schadenfeuer theoretisch hinreichend genau zu berechnen. Diese Voraussetzung ist in vielen Fällen nicht gegeben. Die Entwicklung von Brandszenarien im Rahmen einer rein theoretischen Modellierung ist nämlich nur dann möglich, wenn im Rechenprogramm die notwendigen physikalischen Grundlagen eingearbeitet sind. Eingangsgrößen für einen simulierten Brand in einem definierten Brandabschnitt oder Raumbereich eines Brandabschnittes sollten zumindest sein:

- Art und Anordnung der Brandlast (Heizwert),
- Fläche des Brandherdes zum Zeitpunkt $t=0$,
- max. Fläche des Brandherdes im Raum,
- Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes (v_x , v_y , und v_z), ggf. in Abhängigkeit von der Brandbelastung und der Temperatur,
- spezifische Abbrandgeschwindigkeit der brennbaren Stoffe bei gegebener Ventilation bzw. Sauerstoffzufuhr,
- Form und Verteilung sowie Luftbedarf des Brandgutes,
- Verbrennungseffektivität auch bei Löschmaßnahmen.

Soweit die Wirkung einer Sprinkleranlage simuliert werden soll, sind die Anordnung der Sprinklerköpfe in Bezug auf den Brandherd, die Sprinklerdaten der Sprinklerköpfe (Wasserleistung, RTI-Wert, Wärmekapazität, Tropfenspektrum) sowie die Beeinflussung der Abbrandgeschwindigkeit und Brandausbreitung durch die Sprinklerbeaufschlagung als zusätzliche Eingabedaten bereitzustellen.

Heizwert, Luftbedarf und Brandausbreitung sind brandlastspezifische Parameter. Allerdings dürfte die Brandausbreitung auch von der Geometrie der Räumlichkeiten und der Anordnung der Brandlasten abhängen. Zur Berechnung des Brandablaufes kann in erster Näherung das im Brandsimulationsprogramm MRFC beschriebene Brandausbreitungsmodell verwendet werden [13]. In Abhängigkeit von der Brandfläche erhält man für die Energiefreisetzung (heat release rate) eines Brandes folgende Beziehung:

$$Q_C = \dot{r}_{sp} \cdot H_U \cdot A_f \cdot \chi \quad \text{Gl. (5.2)}$$

Darin sind:

- Q_C Brandleistung in kW
- $\dot{r}_{sp}$ spezifische Abbrandgeschwindigkeit in $\text{kg/m}^2\text{h}$
- H_U unterer Heizwert in kWh/kg

A_f aktuelle Brandfläche in m^2
 χ Verbrennungseffektivität.

Die aktuelle Brandfläche bei horizontaler Ausbreitung in zwei Richtungen bzw. als Kreisfläche errechnet sich wie folgt:

$$A_f = X \cdot Y \text{ oder } A_f = \pi \cdot R^2 \text{ in } m^2 \quad \text{Gl. (5.3)}$$

mit

$$X = a_o + v_x \cdot t \text{ bzw. } R = R_o + v_x \cdot t \quad \text{Gl. (5.4)}$$

und

$$Y = b_o + v_y \cdot t \quad \text{Gl. (5.5)}$$

Darin sind:

a_o Länge der Zündfläche in X-Richtung in m
 b_o Länge der Zündfläche in Y-Richtung in m
 R_o Radius der Zündfläche in m
 R Radius der Brandfläche in m
 v_x Brandausbreitung in X-Richtung in m/min
 v_y Brandausbreitung in Y-Richtung in m/min
 t Branddauer nach der Zündung in min.

In den nachstehenden Tabellen 5.1 bis 5.3 sind die nach bisher bekannten Literaturwerten einzusetzenden spezifischen Abbrandgeschwindigkeiten und Brandleistungen von brennbaren Flüssigkeiten, Kunststoffen und sonstigen Feststoffen angegeben.

Tabelle 5.1: Literaturwerte von Abbrandgeschwindigkeiten für brennbare Flüssigkeiten nach [39], [7] und [8]

Brennbare Flüssigkeit	spez. Abbrandgeschwindigkeit in kg/m^2min und kW/m^2 nach					
	[39]		[7]		[8]	
	[kg/m^2min]	[kW/m^2]	[kg/m^2min]	[kW/m^2]	[kg/m^2min]	[kW/m^2]
Azeton	2,63	1262	2,5	1200	-	-
Ethylalkohol	0,93	419	0,9	405	-	-
Methylalkohol	0,95	308	1,0	324	2,8-3,8	907-1231
Benzin	1,53	2106	3,3	2356	1,0*)-2,1*)	714-1499
Reinigungsbenzin	-	-	2,9	2071	0,43-1,1*)	307-785
Benzol	0,87	-	5,1	3397	-	-
Cyclohexan	-	-	-	-	0,51-1,4*)	379-1042
Dieselöl	1,1	772	2,1	1474	-	-
Erdöl	1,2	835	1,3	905	-	-
Heizöl	0,92	646	-	-	0,43-1,7*)	302-1193
Isopropanol	-	-	-	-	0,32-1,1*)	144-495
Kerosin	0,82	-	2,3	1656	-	-
Maschinenöl	0,67	-	3,1	1823	-	-
Motorenöl	0,55	-	3,2	1882	-	-
Petroleum	2,9	2105	-	-	-	-
Terpentinöl	2,05	1415	-	-	-	-
Toluol	2,31	1566	-	-	-	-
Xylol	1,73	1152	-	-	-	-

*) Versuche wurden bei Luftunterschuss durchgeführt

Die Werte zeigen, dass die brennbaren Flüssigkeiten nach amerikanischen Daten [7] deutlich schärfer bewertet werden, als nach deutschen Angaben [39] und [8]. Die Werte nach [8] sind teilweise deshalb so niedrig, weil die Versuche vermutlich bei Luftunterschuss durchgeführt wurden.

Aus den Tabellen 5.1 bis 5.3 geht hervor, dass die spezifischen Abbrandraten fester Stoffe in weiten Grenzen variieren, wobei bei der Bestimmung der Werte offenbar die verwendeten Meßmethoden, die Form und Lagerdichten der Proben sowie die Luftzufuhr von großem Einfluss sind.

In der Praxis lassen sich die tatsächlichen Verhältnisse nicht vorhersagen, so dass bei rechnerischen Untersuchungen tendenzmäßig die oberen Werte der Tabellen zu nehmen sind, wenn keine genaueren Angaben vorliegen.

Tabelle 5.2: Abbrandgeschwindigkeiten für feste Stoffe (ohne Kunststoffe) nach [39] und [8]

Feststoff	Abbrandgeschwindigkeit in kg/m ² min und kW/m ² nach			
	[39]		[8]	
	[kg/m ² min]	[kW/m ²]	[kg/m ² min]	[kW/m ²]
Autoreifen	0,53	388	0,86 ^{*)} -1,0 ^{*)}	630-732
Baumwolle	0,24	62	-	-
Baumwollstoff	0,72	268	-	-
Bücher (Regal)	0,33	83	-	-
Dachbahn	-	-	1,3 ^{*)} -1,8 ^{*)}	624-864
Gummiormteile	0,53-0,8	388-588	0,7-0,86	512-630
Holz	0,67-1,0	193-288	> 2,0 ^{*)}	-
Holzmöbel	0,9	259	0,93-1,2	268-346
Kautschuk	0,53-0,8	388-588	-	-
Karton	-	-	1,3-1,5	328-378
Korbwaren	-	-	1,3-2,2 ^{*)}	374-634
Margarine	-	-	0,38-0,5	205-270
Papier	0,4-0,48	91-103	1,2-1,6	274-365
Putzlappen (ölig)	-	-	0,7-0,86	370-545
Roggenmehl	-	-	0,54-0,6	149-166
Sanitärkrepp	-	-	0,53-0,65	118-144
Schuhkarton	-	-	1,3-1,7	328-428
Sperrholz	-	-	0,5-0,59	144-170
Teppichfilz	-	-	0,35-1,2	126-432
Tonkassetten	-	-	0,29-0,57	104-205
Textilabfall mit Polym.	0,25-1,04	123 - 512	-	-

^{*)} Versuche wurden bei Luftunterschuss durchgeführt.

Die Abbrandraten sind üblicherweise auf die Lagergrundfläche zu beziehen. Bei Regallagerung ist bei einer Brandausbreitung über eine Regalebene hinaus die jeweils betroffene Regaloberfläche als Bezugsgröße zu wählen.

Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen sind in den folgenden Tabellen 5.3 bis 5.6 angegeben. Die praktischen Erfahrungen sind diesbezüglich gering, typische Werte in großen Industriehallen liegen bei 0,3 bis 1,0 m/min.

Aus den Tabellen 5.4 und 5.5 geht hervor, dass die Brandausbreitung bei Flüssigkeiten und Gasen praktisch spontan erfolgt, das heißt, die Energiefreisetzung richtet sich nach der vorhandenen Poolgröße (Flüssigkeit) oder den jeweils ausströmenden Mengen an Flüssigkeiten oder Gasen z. B. an Leckagestellen.

Tabelle 5.3: Abbrandgeschwindigkeiten von Kunststoffen nach [9], [7] und [8]

Kunststoff	Abbrandgeschwindigkeit in kg/m ² min und kW/m ² nach			
	[9] und [7]		[8]	
	[kg/m ² min]	[kW/m ²]	[kg/m ² min]	[kW/m ²]
Acrylnitril	-	-	-	-
Cellulose	-	-	-	-
Melamin	-	-	-	-
Nylon 6.6	-	-	-	-
PMMA	0,6-1,4	248-580	-	-
Polyamid	-	-	0,39-0,504	190
Polycarbonat	1,5	774	-	-
Epoxitharz	-	-	0,45-0,534	246-292
Polyesterharz	0,54-1,0	172-318	-	-
Polyethylen	0,84	615	0,408-0,522	299-382
Polyethylen-Formteile	-	-	0,414-0,648	303-474
Polypropylen	0,504-0,84	369-615	0,174-0,462	127-338
Polyoxymethylen	0,384-0,96	99-248	-	-
Polystyrol	0,846-2,1	563-1399	0,348-0,408	231-272
PVC – weich	-	-	0,552-0,72	173-268
PU-hart	1,6-2,7	643-1085	0,552-0,72	222-289
PU-weich	0,492-1,9	189-730	1,2-1,5*)	461-576
PVC-Kabel	1,0-1,3	300-390	0,576-0,684	173-205

*) Versuche wurden bei Luftunterschuß durchgeführt.

Tabelle 5.4: Brandausbreitungsgeschwindigkeit für brennbare Gase bei räumlicher Verbrennung nach [39]

Brennbares Gas	Lineare Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min
Wasserstoff	160,0
Methan	22,2
Acetylen	81,0
Ethylen	37,8

Tabelle 5.5: Brandausbreitungsgeschwindigkeit von brennbaren Flüssigkeiten nach [39]

Brennbare Flüssigkeit	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min	
	bei 10°C	bei 20°C
Azeton	19,0	-
Ethylalkohol	7,8	22,8
Buthylalkohol	2,5	4,8
Diethylalkohol	22,5	-
Toluol	10,2	50,4

Typische Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für feste Stoffe sind in Tabelle 5.5 angegeben. Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass die Anordnung der brennbaren Stoffe für die Ausbreitung mit entscheidend ist. Bei den meisten brennbaren Feststoffen ist danach mit schnellen bis sehr schnellen Brandausbreitungen zu rechnen.

Tabelle 5.6: Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei festen Stoffen nach [39]

Brennbare Stoffe, Objekte	Mittlere Brandausbreitungsgeschw. in m/min
Bauten mit Holzkonstruktionen, Möbel usw.	1,0-1,2
Gummierzeugnisse im Stapel auf offener Fläche	1,1
Bretterstapel	2,0
Rundholzstapel	0,23-0,70
Kautschuk in geschlossenem Lager	0,4
Strohdach (trocken)	25,0
Papier in Rollen	0,27
Textilerzeugnisse in geschlossenem Lager	0,33
Torf in Stapeln	1,0
Decken bei großen Werkhallen	1,7-3,2

Unter der Annahme einer etwa quadratischen Ausbreitung eines Brandes mit einer Geschwindigkeit von 1,0 m/min ist somit zu erwarten, dass sich nach 10 min Branddauer Brandflächen von 300 bis 400 m² ergeben. Diese Größe entspricht in etwa den Erfahrungen der öffentlichen Feuerwehr, die im Normalfall nach rund 10 min den Brandort erreicht. Sie ist dann allerdings sofort mit einem Großbrand konfrontiert, der nur noch bei günstigen Voraussetzungen kontrolliert und zum Stehen gebracht werden kann.

5.2 Ermittlung eines Design Fires aus einer gegebenen Brandlastaufstellung

Bei vielen ingenieurmäßigen Brandschutzbetrachtungen wird im Vorfeld der Untersuchung eine Brandlastaufnahme verlangt und durchgeführt. In der Regel wird bei dieser von brennbaren Stoffen:

- die Menge der einzelnen Stoffe
- die Art (verschiedene brennbare Stoffe)
- die Verteilung,
- die Abbrandcharakteristik (m-Faktor) und
- der Heizwert

erhoben und dokumentiert. Diese Brandlastaufnahme dient nun als Grundlage für verschiedenste Bemessungen. Ausgehend von diesen Daten lassen sich aber auch für den erhobenen Fall theoretische Design Fire - Kurven ableiten. Solche Kurven können nach ingenieurmäßiger Überprüfung mit bekannten experimentellen Daten, beispielsweise als Brandszenarium für eine vollständige Wärmebilanzrechnung dienen. Für ein solches abgeleitetes Brandszenarium sind aber noch zusätzliche Angaben über die mögliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes notwendig, welche im allgemeinen nicht bekannt ist.

Die folgenden Algorithmen beschreiben einen Weg um aus der Brandlastaufstellung näherungsweise ein sich zeitlich entwickelndes Design Fire zu ermitteln. Es werden Vereinfachungen insofern angenommen, als das viele der verwendeten Größen über den gesamten Temperaturbereich als konstant angesehen werden.

Grundlage des Algorithmus ist die Formulierung der Brandleistung zu einem bestimmten Zeitpunkt t:

$$\dot{Q}(t) = \sum_{i=1}^n \dot{r}_i \cdot A_i \cdot H_{u,i} \cdot f_i^{\text{ant}} \cdot f_i^{\text{syn}} \cdot \chi_i \quad \text{Gl. (5.6)}$$

Darin sind:

$\dot{Q}(t)$	Brandleistung zum Zeitpunkt t in kW
$\dot{r}_i$	spezifische Abbrandgeschwindigkeit des Stoffes i bezogen auf die wirksame Brandfläche in kg/m ² h
A_i	wirksame Brandfläche in m ²
$H_{u,i}$	unterer Heizwert des Stoffes i in kWh/kg
f_i^{syn}	synergetischer Faktor zur Berücksichtigung der Wechselwirkung des Stoffes i mit den anderen brennbaren Stoffen
f_i^{ant}	Anteil der brennenden Stofffläche bezogen auf die maximal mögliche wirksame Brandfläche
χ_i	Verbrennungseffektivität des Stoffes i zum Zeitpunkt t

Nimmt man für den Anteilsfaktor $f_i^{\text{ant}}(t)$ einen flächenbezogenen Ansatz so gilt für $A_{i,\text{max}}(t) > 0$ zu jedem Zeitpunkt t:

$$f_i^{\text{ant}}(t) = \frac{A_i(t)}{A_{i,\text{max}}(t)} \cdot f_i^{\text{m}} \quad \text{Gl. (5.7)}$$

Darin sind:

$f_i^{\text{ant}}(t)$	Faktor zur Berücksichtigung des brennenden Anteils des einzelnen Stoffes i
f_i^{m}	Ausbreitungsfaktor zur Berücksichtigung der Brandentwicklung des Stoffes i
$A_i(t)$	Anteil der brennenden Fläche des Stoffes i [kg]
$A_{i,\text{max}}(t)$	maximale bei einem Brand wirksame Fläche des Stoffes i [kg]

Eine starke Vereinfachung wird bei der Wechselwirkung verschiedener Stoffe im Brandfall getroffen. Solche Faktoren sind gegenwärtig nicht einmal noch annähernd prognostizierbar, sieht man von möglichen Ausnahmen im Bereich von brennenden Flüssigkeitsgemischen ab. Ein sehr anschauliches Beispiel für die Wechselwirkung verschiedener Stoffe bei der Verbrennung ist zweifelsohne das Schwarzpulver. Die Einzelkomponenten dieses Stoffgemisches sind im Falle von Schwefel und Holzkohle zwar brennbar, brennen aber relativ langsam ab. Der Salpeter (Kaliumnitrat) ist als Einzelsubstanz überhaupt nicht brennbar. Erst im Gemisch entsteht aus den schwer brennbaren Einzelkomponenten ein leicht entzündliches und rasch verbrennendes (explodierendes) Pulver. Ursache für dieses Phänomen ist neben einem physikalischen auch ein chemisches.

Ein weiteres Beispiel für eine rasch ablaufende Verbrennung von zwei (richtiger wäre eigentlich nur einem) Stoff stellt die Kerze dar. Paraffine sind in der Regel schwer brennbar, am Docht hingegen verbrennt Paraffin sehr leicht.

Zur Bestimmung der Stoffmenge des Stoffes i zum Zeitpunkt t ist für den Fall, dass der Stoff zum Zeitpunkt t = 0 zu brennen beginnt, die folgende Beziehung heranzuziehen.

$$m_i(t) = \int_0^t \dot{r}_i \cdot A_i(t) \cdot f_i^{\text{ant}}(t) \cdot f_i^{\text{syn}} \cdot dt \quad \text{Gl. (5.8)}$$

Darin sind:

$m_i(t)$ Masse des Stoffes i zum Zeitpunkt t [kg]
 $m_i(t=0)$ Masse des Stoffes i zum Zeitpunkt t = 0 [kg]
 t Zeit [h]
 $A_i(t)$ Brandfläche des Stoffes i zum Zeitpunkt t
 $\dot{r}_i$ Stoffspezifische Abbrandrate [kg/m²h]
 f_i^{syn} synergetischer Faktor zur Berücksichtigung der Wechselwirkung der einzelnen Stoffe für den Stoff i [1]

Die Masse der zum Zeitpunkt t verbleibenden brennbaren Materialien ergibt sich dann wie folgt:

$$m_g(t) = \sum_{i=1}^n m_i(t) \quad \text{gilt für } m_g(t) > 0 \text{ zu jedem Zeitpunkt } t \quad \text{Gl. (5.9)}$$

Darin sind:

$m_i(t)$ Masse des Stoffes i zum Zeitpunkt t [kg]
 $m_g(t)$ Gesamtmasse aller brennbaren Stoffe zum Zeitpunkt t [kg]

Die Brandfläche A zum Zeitpunkt t ist abhängig vom angenommen Ausbreitungsmodell. Üblicherweise wird von einer symmetrischen Ausbreitung in einer Ebene mit einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit v in m/s ausgegangen.

Für eine kreisförmige Brandfläche bestimmt sich die Brandfläche zum Zeitpunkt t wie folgt:

$$A_i(t) = r_i^2(t) \cdot \pi \quad \text{Gl. (5.10)}$$

mit

$$r_i(t) = v \cdot \max[(t - t^*); 0] \quad \text{Gl. (5.11)}$$

somit ergibt sich

$$A_i(t) = v^2 \cdot (\max[(t - t^*); 0])^2 \cdot \pi \quad \text{Gl. (5.12)}$$

Darin sind:

$A_i(t)$ Brandfläche des Stoffes i zum Zeitpunkt t Sekunden [m²]
 $v(t)$ Brandausbreitungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t [m/s]
 t Zeitpunkt [s]

t^* Zeitpunkt von $t=0$ bis zur Entzündung des Stoffes i [s]
 $r_i(t)$ Radius der kreisförmigen Brandfläche auf der der Stoff i zum Zeitpunkt t brennt [m]

Analog kann für eine quadratische Brandfläche angesetzt werden:

$$A_i(t) = a_i^2(t) \quad \text{Gl. (5.13)}$$

mit

$$a_i(t) = v \cdot \max[(t - t^*); 0] \quad \text{Gl. (5.14)}$$

somit ergibt sich

$$A_i(t) = v^2 \cdot (\max[(t - t^*); 0])^2 \quad \text{Gl. (5.15)}$$

Darin sind:

$A_i(t)$ Brandfläche des Stoffes i zum Zeitpunkt t Sekunden [m^2]
 $v(t)$ Brandausbreitungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t [m/s]
 t Zeitpunkt [s]
 t^* Zeitpunkt von $t=0$ bis zur Entzündung des Stoffes i [s]
 $a_i(t)$ Seitenlänge der quadratischen Brandfläche des Stoffes i zum Zeitpunkt t [m]

Wenn die Ausbreitung in zwei verschiedene, rechtwinkelig aufeinander stehenden Richtung unterschiedlich abläuft, kann man schreiben:

$$A_i(t) = a_i(t) \cdot b_i(t) \quad \text{Gl. (5.16)}$$

mit

$$\begin{aligned} a_i(t) &= v_a \cdot \max[(t - t^*); 0] \\ b_i(t) &= v_b \cdot \max[(t - t^*); 0] \end{aligned} \quad \text{Gl. (5.17)}$$

somit ergibt sich

$$A_i(t) = v_a \cdot v_b \cdot (\max[(t - t^*); 0])^2 \quad \text{Gl. (5.18)}$$

Darin sind:

$A_i(t)$ Brandfläche des Stoffes i zum Zeitpunkt t Sekunden [m^2]
 $v_a(t)$ Brandausbreitungsgeschwindigkeit in Richtung a zum Zeitpunkt t [m/s]
 $v_b(t)$ Brandausbreitungsgeschwindigkeit in Richtung b zum Zeitpunkt t [m/s]
 t Zeitpunkt [s]
 t^* Zeitpunkt von $t=0$ bis zur Entzündung des Stoffes i [s]
 $a_i(t)$ Seitenlänge a der rechteckigen Brandfläche des Stoffes i zum Zeitpunkt t [m]
 $b_i(t)$ Seitenlänge b der rechteckigen Brandfläche des Stoffes i zum Zeitpunkt t [m]

5.3 Praktische Erfahrungen

Aus den vorstehenden Daten lassen sich die spezifischen Brandleistungen für definierte Brandszenarien gemäß den Gleichungen Gl. (5.2) bis Gl. (5.5) rechnerisch ableiten. Diese Daten können zusätzlich mit Erfahrungen aus realen Bränden verglichen werden. Hierzu ein Beispiel:

Aus der Tabelle 5.7 geht hervor, dass die beobachteten spezifischen Brandleistungen von Feststoffen wie Holz, Papier und Pappkartons in nicht hochgestapelter Lageranordnung bei 100 bis 600 kW/m² liegen.

Berechnungen mit den zuvor genannten Abbrandparametern gemäß der Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 ergeben Abbrandleistungen zwischen 100 und 576 kW/m² für diese Stoffe, das heißt die in der Praxis beobachteten Werte lassen sich anhand der Tabellenwerte gut reproduzieren.

Aufgrund der begrenzten Datenbasis aus Großversuchen sind Vergleiche bei anderen Stoffgruppen nicht möglich. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand sind die Versuchswerte jedoch übertragbar und für theoretische Brandschutzanalysen anzuwenden. Dieses wird im folgenden anhand einer Regallagerung beispielhaft aufgezeigt.

Tabelle 5.7: Beobachtete spezifische Brandleistungen bei realen Schadenfeuern nach [10]

Brandlast im Gebäude	Raumgröße [m ²]	Äquivalente Holzbrandlast [kg]	Verbrannte Brandlast [kg]	gemessene Brandleistung [kW/m ²]
Möbel in Kisten	170	140 000	450	100
Fahrzeuge	260	145	36	260
Holzstapel	170	4 500	730	390
Bücher, Möbel	460	44 000	11 000	93
Kartonstapel	90	16 500	5 400	320
Holzspanplatten	300	220 000	18 000	86
Kartons mit Elektro- artikel	2 200	116 000	28 600	310
Pappkartons	1 300	113 000	113 000	620
Papprollen	2 500	2 540 000	510 000	210
Verpackungen	10 200	7 200 000	3 740 000	540
Holzkippen*)	28,5	872	872	300
Pappkarton*)	28,5	408	408	480

*) Versuchsbrände nach [10]

Eine Berechnung der Brandleistung in einem Regal von 5 m Höhe, 3 m Breite und 34 m Länge, welches in einer Regalanlage einer Industriehalle von 2400 m² Grundfläche angeordnet ist, führt auf die in der Abbildung 5.1 zusammengestellten Werte. Als Bezugsgrößen für den Abbrand wurde die Regaloberfläche von ca. 13 x 34 m² gewählt, wobei die Brandausbreitung mit 5,0 m/min (vertikal) und 0,5 m/min (horizontal) festgelegt wurde. Gelagert sind in dem Regal jeweils 15 t brennbare Stoffe (inklusive Verpackung) mit folgenden mittleren Abbrandleistungen:

- Baumwollballen: 100 kW/m²,
- Roggenmehl, Papier: 200 kW/m²,
- Autoreifen oder PP-Kisten plus PE-Teile: 600 kW/m².

Aus der Abbildung 5.1 geht hervor, dass die Brandleistungen extrem groß werden, wenn der Kunststoffanteil im Regal steigt. Brandleistungen von ca. 10^5 kW sind von der Feuerwehr praktisch nicht mehr beherrschbar, d. h., in solchen Fällen ist der Einbau einer Regalsprinklerung unabdingbar.

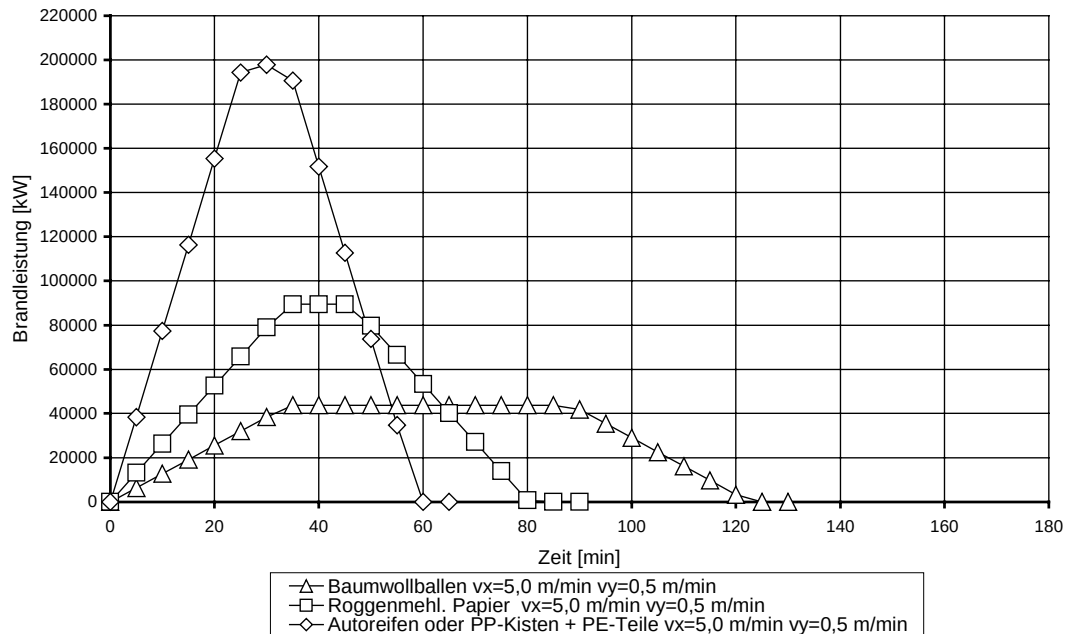


Abbildung 5.1: Brandleistungen bei Regalbränden mit verschiedenen Lagergütern

Aufgrund der guten Ventilation der Industriehalle stand in dem obigen Beispiel in allen Fällen genügend Sauerstoff zu Verfügung, um den Brand optimal zu unterhalten. Die Höhe der Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist im vorliegenden Fall praktisch ohne Einfluss auf das Rechenergebnis, d. h., die Brandausbreitung im Regal erfolgt jeweils in einem Zeitraum von kleiner 10 min, so dass sich in Bezug auf den gesamten Brandverlauf nur geringe Einflüsse ergeben, wenn man die Ausbreitungsgeschwindigkeiten im praktisch sinnvollen Bereich variiert. Nur bei extrem kleinen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten sind diesbezüglich unterschiedliche Auswirkungen zu erwarten.

Mit den so definierten Brandleistungen kann das Brandgeschehen bei einem Regalbrand in einer Halle durch eine Wärmebilanzrechnung z. B. hinsichtlich der

- Temperaturentwicklung,
- Branddauer,
- Rauchentwicklung,
- Bauteilbeanspruchung,
- Sprinklerauslösung,
- Löschmöglichkeit und
- äquivalenten Normbranddauer

theoretisch untersucht werden. Soweit sich mehrere Regale gleichzeitig am Brand beteiligen können, sind zusätzliche Überlegungen erforderlich.

6 Literatur

[1]	Ulrich Schneider, Lebeda Christian: Baulicher Brandschutz, Verlag W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart, 2000
[2]	Schneider, U.: Grundlagen zur Festlegung von Brandszenarien für den Brandschutzentwurf, Zeitschrift vfdb, Heft 3, Verlag W. Kohlhammer GmbH, S.92-100, Stuttgart, 1995
[3]	Butcher, E.G.; Chitty, T.B.; Ashton, L.A.: The temperature attained by steel in building fires. Fire Research Techn. Paper No. 15. HMSO, London, 1966
[4]	Ehm, H.; Arnault, P.: Versuchsbericht über die Untersuchungen mit natürlichen Bränden im kleinen Versuchshaus. Europäische Konvention der Stahlbauverbände, DOC C.E.A.C.M. 3.1-62/29-D.F, 1971
[5]	Arnault, P.; Ehm, H.; Kruppa, J.: Rapport experimental sur les essais avec des feux naturels executes dans la petite installation. Convention Europeene de la construction metallique, DOC C.E.C.M. – 3173-11-F, 1971
[6]	Bechtold, R; Ehler, K.-P.; Wesche, J.: Brandversuche in Lehrte Schriftenreihe Bau- und Wohnforschung des BMBau, Bericht Nr. 04.037, Bonn, 1978
[7]	Lee, B. T.: Heat Release Rate Characteristics of some combustible Fuel Sources in Nuclear Power Plants. NBSIR 85-3195, Nat. Bur. of Stand., Gaithersburg, 1985
[8]	Dobbernack, R.: Auswertung zur spezifischen Abbrandrate der vorliegenden m-Faktor-Versuche. IBMB, TU Braunschweig, Feb. 1995, (unveröffentlicht)
[9]	Gross, D.: Data Sources for Parameters used in predictive Modeling of Fire Growth and Smoke spread. NBSIR 85-3223, Nat. Bur. of Stand., Gaithersburg, 1985
[10]	Theobald, C. R.: Growth and development of Fires in Industrial Buildings. CP 40/78, BRE Fire Research Station, Borhamwood, 1978
[11]	Europäische Kommission: Grundlagendokument; Wesentliche Anforderung Nr. 2, Brandschutz. Amtsblatt der EU, Nr. C 62/23, Brüssel, Febr. 1994
[12]	Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit (AGB): Referenzhandbuch für MRFC (M ulti R oom F ire C ode), Version 2.5, Bruchsal/Wien 1998
[13]	Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB: Validierung von Rechenprogrammen, Forschungsvorhaben RS II 2-67 41-97.116 für das Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Endbericht, Oktober 1999.
[14]	International Standards Organisation : Fire Safety Engineering: The Application of Fire Performance Concepts to Design Objectives, ISO CD 13387, May 1997.
[15]	International Standards Organisation : Fire Safety Engineering: Design Fire Scenarios and Design Fires, ISO CD 13388, May 1997.
[16]	International Standards Organisation : Fire Safety Engineering: Assessment and Verification of mathematical Fire Models, ISO CD 13389, May 1997.
[17]	International Standards Organisation : Fire Safety Engineering: Subsystem 1: Initiation and Development of Fire and Fire Effluents, ISO CD 13390, May 1997.
[18]	International Standards Organisation : Fire Safety Engineering: Subsystem 2: Movement of Fire Effluents, ISO CD 13391, May 1997.
[19]	International Standards Organisation : Fire Safety Engineering: Subsystem 3: Fire Spread beyond the Enclosure of Origin, ISO CD 13392, May 1997.
[20]	International Standards Organisation : Fire Safety Engineering: Subsystem 4: Detection, Activation and Suppression, ISO CD 13393, May 1997.

[21]	International Standards Organisation : Fire Safety Engineering: Life Safety, ISO CD 13394, May 1997.
[22]	Böckenförde, D. et al.: Musterbauverordnung für die Länder der BRD. Fassung von 4 Mai 1990, Werner Verlag, Düsseldorf, 1990.
[23]	Max, U.: Zur Berechnung der Ausbreitung von Feuer und Rauch in komplexen Gebäuden, Dissertation, Gesamthochschule Kassel, 1990.
[24]	Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit: Referenzhandbuch für MRFC (<u>M</u> ulti <u>R</u> oom <u>F</u> ire <u>C</u> ode), Version 2.6, Bruchsal/Wien, September 1999.
[25]	Schneider, U.; Max, U.; Lebeda, C.: Untersuchungen zur Bewertung von Brand-simulationsmodellen für die Festlegung ihrer Anwendungsgebiete und Grenzen, VdS Fachtagung „Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (4)“, Köln, 24.04.1997.
[26]	Schneider, U.; Max, U.: Neuberechnung der Wärmeabzugsfaktoren w für die DIN V 18230 Teil 1 - Baulicher Brandschutz im Industriebau, Forschungs-bericht für das Institut für Bautechnik, Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit, München/Kassel, Mai 1990.
[27]	prEN 12101-5: Rauch- und Wärmeschutzeinrichtungen, Teil 5: Funktionsanfor-derungen und Rechenverfahren für Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. CEN/TC191/SC1/WG5. Rohübersetzung NABau 0036. 35.00 Nr. 74-98, Berlin, 1998
[28]	J. Wiese, P. Reichelt : Erstellen von Gesamtbrandschutzkonzepten und deren Bewertung unter Verwendung von ingenieurmäßigen Brandsicherheits-nachweisen, VdS-Fachtagung „Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (5)“; 1998
[29]	U. Schneider: Festlegung von Brandszenarien für den Entwurf von Gebäuden und für die Risikobetrachtung, VdS-Fachtagung „Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (2)“; 1995
[30]	The SFPE Handbook of Fire Safety Engineering, SFPE/NFPA, 1995, NFPA, Quincy MA (USA)
[31]	Draft British Standard Code of Practice for Application of Fire Safety Engi-neering Principles to Fire Safety in Buildings Document 94/340340 DC, 3. June 1994, BSI, London (GB).
[32]	Technische Richtlinien für den Brandschutz : TRVB A 126, Brandschutztechni-sche Kennzahlen verschiedener Nutzungen, Lagerungen, Lagergüter; Ausgabe 1987, Österreichischer Berufsfeuerwehrverband und die österreichischen Brand-verhütungsstellen.
[33]	Schneider U, Lebeda C., Max, U.: DIN 18232 - Stand der Erkenntnisse und neue Forschungsergebnisse für die Bemessung von Rauchabzügen, Beitrag zu den Braunschweiger Brandschutztagen 1997.
[34]	Schneider U, Lebeda C.: Rauchabzug nach dem Entwurf DIN 18232-5, vfdb Zeitschrift, Heft 1, 48. Jahrgang, Januar 1999.
[35]	DIN: DIN V 18230-1, Baulicher Brandschutz im Industriebau. Beiblatt 1, Stand November 1989.
[36]	Technische Richtlinien für den Brandschutz : TRVB S 126, Rauch- und Wär-meabzugsanlagen; Ausgabe 1977, Österreichischer Berufsfeuerwehrverband und die österreichischen Brandverhütungsstellen.
[37]	Schneider, U.; Lebeda, C.: Bewertung des Abbrandverhaltens von Stoffen und Waren. Beitrag in Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (5). VdS Scha-denverhütung, Köln, 1998
[38]	National Institute of Standards and Technology: Building and Fire Research Laboratory, http://fire.nist.gov/fire/fires/fires.html , 2000

[39]	o. A.: Brandschutz Formeln und Tabellen. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1979
[40]	Ulrich Schneider: Aktuelle Möglichkeiten von Brandschutzkonzepten, Austro Sicherheit Wien, Tagungsband S. 59 – 113, SIMEDIA GmbH, Wien, 1999
[41]	Ulrich Schneider, Christian Lebeda: Anforderungen an Brandschutzkonzepte für Sonderbauten, Seminar BMBAU, Köln, 1999