

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Entwicklung der letzten Jahre läßt erkennen, daß neben den Standsicherheitsüberlegungen, die durch Statik und Bemessung von Bauwerken geregelt sind, immer mehr die anderen Bereiche wie Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz, Brandschutz und Umweltschutz auf die Planung und Errichtung von Bauwerken Einflüsse ausüben. Bei der Planung und der daraus folgenden Bemessung von Bauwerken sind im wesentlichen folgende Schutzmaßnahmen zu beachten:

- Standsicherheit
- Wärmeschutz
- Feuchteschutz
- Schallschutz
- Brandschutz
- Umweltschutz

Besonders der Einfluß des Brandschutzes ist bei der Bemessung im Hinblick auf die spätere Nutzung und den Betrieb von wesentlicher Bedeutung.

Hinkünftig sollte auch der Brandschutz, aufgrund der ständig anwachsenden Brandgefahren, sowohl hinsichtlich der Vielfältigkeit der Brandursachen und Brandobjekte als auch in bezug auf die Größe der Brände, vermehrt in der Planung Beachtung finden. Die wirtschaftliche Entwicklung der letzten Jahre hat zu vermehrter Bedacht-
nahme auf volkswirtschaftliche Belange geführt, so daß auch der Einfluß der Brandschäden auf die Wirtschaft, u. a. im Interesse der Arbeitsplatzsicherung, einen besonderen Stellenwert besitzt.

Die Brandschadenstatistik der österreichischen Brandverhütungsstellen zeigt, daß der enorme Anstieg der Brandschadenssummen in den letzten Jahren in erster Linie auf Großschäden zurückzuführen ist. Sie sind einerseits durch die Großräumigkeit der Objekte, auf mangelnde Brandabschnittsbildung, die Nichtbeachtung von Sicherheitsvorschriften, und andererseits durch die ständig zunehmenden Wertkonzentrationen und den Anstieg der Brandbelastungen durch vermehrtes Inventar oder durch zusätzliche, für den Innenausbau verwendete brennbare Materialien - bedingt. Die rasche und ungehemmte Brandausbreitung erfordert im Hinblick auf die Sicherheit der Personen, die sich in den betroffenen Gebäuden befinden, wirksame Gegenmaßnahmen, darüber hinaus muß selbstverständlich der Sachschaden im Interesse der Volkswirtschaft so gering als möglich gehalten werden.

Brandschutzüberlegungen sollen nicht zur "Maximierung von Brandschutzmaßnahmen" führen, sondern müssen durch "Optimierung" - d.h. durch Anpassung an

die jeweiligen Verhältnisse, in einem sicherheitstechnisch und wirtschaftlich gesundem Verhältnis stehen. Betriebswirtschaftliche Betrachtungen führen zu Überlegungen des Vergleichs "Aufwand für den Brandschutz" und "fiktiver Schaden". Geringerer Aufwand für den Brandschutz bedingt im Katastrophenfall großen Schaden und umgekehrt. Die Superposition zwischen Aufwand und Schadenskosten führt bei Betrachtung des Minimums zur Bestimmung des betriebswirtschaftlich optimalen Brandschutzes.

1.2 Brandschutz

Unter dem Begriff „**Brandschutz**“ versteht man alle Maßnahmen zur Vermeidung von Bränden und zur Minimierung von Brandschäden.

Unter dem Begriff „**Vorbeugender Brandschutz**“ versteht man die Gesamtheit aller Maßnahmen vor Brandausbruch, die geeignet sind, Brände möglichst zu vermeiden oder diese an ihrer Ausbreitung zu hindern. Dazu zählen organisatorische und/oder bauliche Maßnahmen, Bereitstellung von Mitteln für die Erste- und Erweiterte-Löschhilfe sowie Versorgung mit Löschmitteln und Vorbereitung zum Einsatz derselben (siehe Abb. 1.2.1).

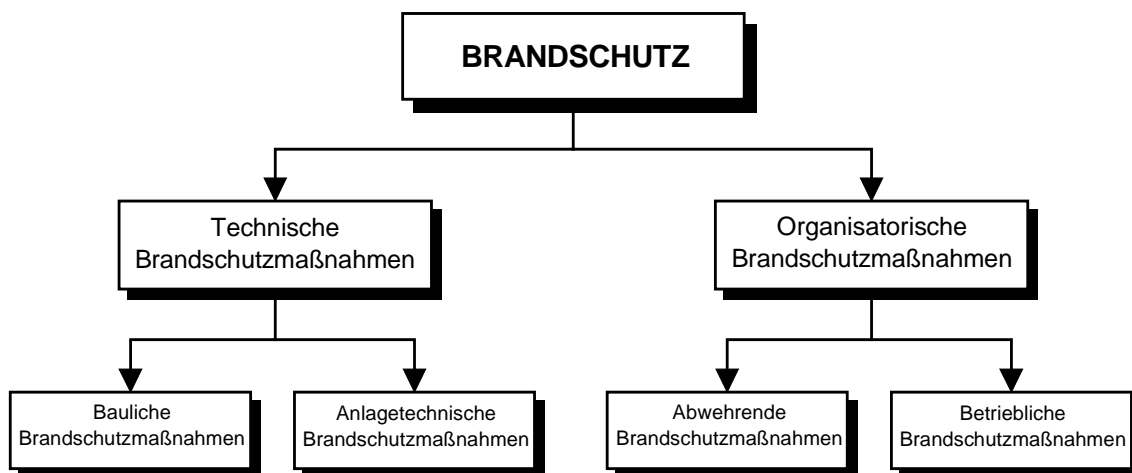


Abbildung 1.2.1: Struktur des Brandschutzes im Bauwesen

1.2.1 Technische Brandschutzmaßnahmen

- Bauliche Brandschutzmaßnahmen
 - Konzeption (Lage, Gebäudehöhe bzw. Bauklasse, Schutzabstände, Brandabschnitte u. dgl.)
 - Bauteilanforderungen (Wände, Decken, Abschlüsse, Verglasungen und dgl.)
 - Baustoffanforderungen (z.B. brennbar, nicht brennbar)
- Anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen
 - Brandmeldeanlagen
 - Brandrauchentlüftungsanlagen
 - Löscheinrichtungen (z.B. Sprinkieranlagen)
 - Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

1.2.2 Organisatorische Brandschutzmaßnahmen

- Brandschutzordnungen
 - Brandschutzbeauftragter
 - Brandschutzpläne, Fluchtwegpläne
 - Betriebsfeuerwehr
 - Öffentliche Feuerwehr

Alle oben genannten Maßnahmen greifen ineinander und beeinflussen sich gegenseitig. Die Gesamtheit der aufeinander abgestimmten technischen und organisatorischen Brandschutzmaßnahmen bilden das „**Brandschutzkonzept**“.

Der Brandschutz setzt sich demnach aus einer Vielzahl baulicher und abwehrender Brandschutzmaßnahmen zusammen. Die vorbeugenden baulichen Brandschutzmaßnahmen werden gelegentlich auch unter dem Oberbegriff passiver Brandschutz zusammengefaßt. Dem gegenüber werden die abwehrenden Brandschutzmaßnahmen als aktiver Brandschutz bezeichnet. Zu den aktiven Maßnahmen gehört insbesondere die Vorrichtung einer öffentlichen oder betrieblichen Feuerwehr.

Daneben werden auch vorbeugende Brandverhütungsmaßnahmen durchgeführt. Diese umfassen u.a. organisatorische Maßnahmen wie Rauchverbote, die Bereitstellung von Handfeuerlöschern und die sichere Verwahrung nicht entzündlicher Stoffe.

Der vorbeugende bauliche Brandschutz umfaßt u.a. folgende Einzelmaßnahmen:

- Vorbeugende Maßnahmen gegen die Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch durch
 - Wahl der Baustoffe
 - Wahl der Konstruktion
 - Wahl der Gebäudeabstände
- Anordnung von Fluchtwegen und von rauch- und brandhemmenden Einrichtungen zur Rettung der Bewohner
- Ermöglichung einer wirksamen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr oder stationäre Löschanlagen

1.3 Ziele des Brandschutzes

Brandschutzmaßnahmen verfolgen zwei grundlegende Ziele:

- ☐ den Schutz von Leben und Gesundheit von Personen im betroffenen Gebäude und dessen Umgebung (**Personenschutz**).
- ☐ den Schutz von Eigentum und die Beschränkung finanzieller Schäden im betroffenen Gebäude und dessen Umgebung (**Sachwertschutz**).

Weitere Schutzinteressen sind:

- Schutz der Umwelt (Luft, Wasser, Erdreich)
- Sicherstellung der Versicherbarkeit des Bauwerkes

In den „wesentlichen Anforderungen“ im Anhang I der Bauproduktenrichtlinie (Richtlinie des Rates der EU vom 21.12.1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte - 89/106/EWG)¹ wird zum Brandschutz folgendes ausgesagt:

Ein Bauwerk muß derart entworfen und ausgeführt sein, daß bei einem Brand

- die Tragfähigkeit des Bauwerkes während eines bestimmten Zeitraumes erhalten bleibt,
- die Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch innerhalb des Gebäudes begrenzt wird,
- die Ausbreitung von Feuer auf benachbarte Bauwerke vermieden wird,
- die Bewohner des Gebäudes unverletzt verlassen oder durch andere Maßnahmen gerettet werden können,
- die Sicherheit der Rettungsmannschaften berücksichtigt ist.

Obwohl die Gefahr, durch einen Brand das Leben zu verlieren, im Vergleich zu anderen Gefahren statistisch gesehen relativ gering ist, besteht allgemein die Tendenz, gegenüber Ereignissen die eine höhere Anzahl von Opfern fordern können, ein erhöhtes Sicherheitsniveau zu verlangen, als bei Ereignissen, die maximal nur ein Opfer verursachen könnten.

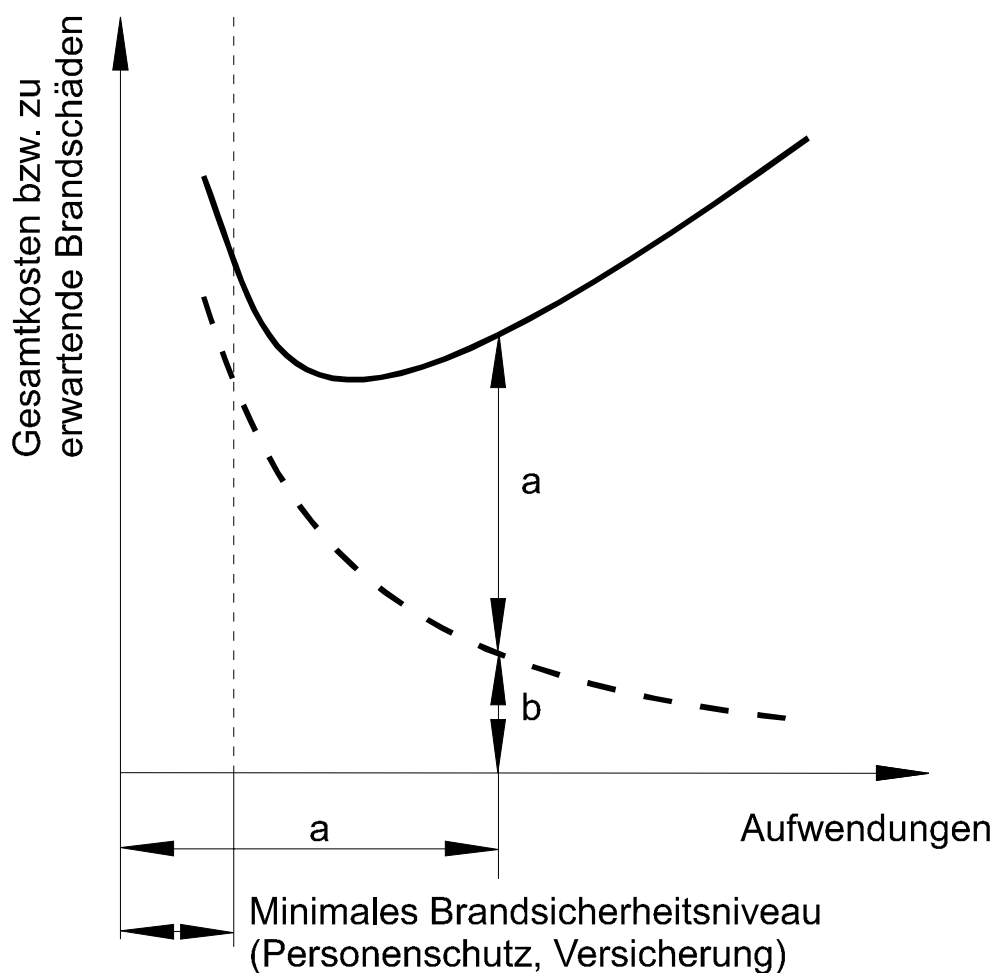
Im Bauwesen sind die zulässigen Versagenwahrscheinlichkeiten der Konstruktionen bei höheren Risiken etwa mit 10^{-6} und bei normalen Risiken (max. 1 Opfer) mit ca. 10^{-5} bewertet.

¹ Die Bauproduktenrichtlinie enthält sechs wesentliche Anforderungen:

1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
2. Brandschutz
3. Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
4. Nutzungssicherheit
5. Schallschutz
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz

Die Verteilung der Personen- und Sachschäden durch Brände nach Untersuchungen in Deutschland, Frankreich und Großbritannien ergeben sich wie folgt (siehe Abbildung 1.3.1)

| Verteilung der Todesfälle nach Gebäudenutzung und Ursache | Verteilung der Sachschäden |
|---|----------------------------|
| 77-84% in Wohngebäuden | 43% am Gebäudeinhalt |
| 9-10% in anderen Gebäuden | 36% an Folgekosten |
| 74-97% durch Rauch und Hitze | 21% am Gebäude selbst |
| 3-26% durch andere Ursachen | |



a ... Brandschutzaufwendungen
b ... Erwartungswert des Brandschadens
 $a + b = \text{Gesamtkosten}$

Abb. 1.3.1: Verteilung der Todesfälle und Sachschäden bei Gebäudebränden

Die vorbeugenden Brandschutzmaßnahmen zur Gewährleistung des Personen- und Sachwertschutzes lassen sich wie folgt zusammenfassen

| Personenschutz | Sachwertschutz |
|---|---|
| 1) Brandverhütung | 1) Brandverhütung |
| 2) Fluchtwege | 2) Konzentration vermeiden |
| 3) Frühzeitiger Löscheinsatz | 3) Frühzeitiger Löscheinsatz |
| 4) Begrenzen der Brandausbreitung | 4) Begrenzen der Brandausbreitung |
| 5) Verhindern des Vollbrandes | 5) Verhindern des Vollbrandes |
| 6) Begrenzen der Personengefährdung nach folgenden Prioritäten: a) Rauch b) Wärme c) Gebäudeeinsturz | 6) Begrenzen der Sachschäden nach folgenden Prioritäten: a) Wärme und Rauch b) Wasser c) Gebäudeeinsturz |

1.4 Brandrisiko

Das Brandrisiko für eine bestimmte Gebäudeart wird üblicherweise mit der nachstehenden Formel beschrieben:

$$R = P_o \cdot L_x \leq R_{\text{grenz}} \quad (1.1)$$

mit: R = vorhandenes Risiko
 R_{grenz} = Grenzkrisiko (allgemein akzeptiertes Risiko)
 P_o = Eintretenswahrscheinlichkeit eines Brandes
 L_x = wahrscheinlicher Schadensumfang (direkter oder indirekter Sach- oder Personenschaden)

Für jedes Gebäude ist das vorhandene Risiko R größer als Null. Das Niveau des akzeptablen Risikos (Grenzkrisikos) hängt ab von der Gebäudenutzung, d.h. der im Gebäude befindlichen Personenzahl und deren Rettungsmöglichkeit sowie den vorausehbaren Sachschäden.

Die Häufigkeit von Bränden (Eintretenswahrscheinlichkeit) wurde weltweit untersucht. Die nachstehende Tabelle 1.3.1 zeigt eine Übersicht der Forschungsergebnisse.

Tabelle 1.3.1: Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden

| Gebäudenutzung | Quelle ² | Eintretenswahrscheinlichkeit von Bränden pro Million m ² Geschoßfläche und Jahr |
|------------------|---------------------|--|
| Industriegebäude | Großbritannien [1] | 2 |
| | Deutschland [2] | 2 |
| | CIB/W14 [3] | 2 |
| Büros | Großbritannien [1] | 1 |
| | USA [4] | 1 |
| | CIB/W14 [3] | 0,5 ÷ 5 |
| Wohnungen | Großbritannien [1] | 2 |
| | Kanada [5] | 5 |
| | Deutschland [6] | 1 |
| | CIB/W14 [3] | 0,5 ÷ 2 |

Die Wahrscheinlichkeit der Entwicklung von Entstehungsbränden zu Vollbränden hängt stark von den aktiven Brandbekämpfungsmaßnahmen ab (Quelle: CIB/W 14 Workshop „Structural Fire Safety, Lausanne 1983). Im folgendem sind diesbezüglich einige Grundwerte genannt, welche in der BRD im Rahmen der Industriebaurichtlinien verwendet wurden (siehe Tab. 1.3.2)

-
- ²
- [1] Baldwin. R.; Thomas, P.H.: Passive and active fire protection - the optimum combination. Fire Research Station, Fire Research Note Nr. 963, London, 1973
 - [2] DIN 18239: Baulicher Brandschutz im Industriebau. Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer Deutsches Institut für Normung e.V.; Berlin 1987
 - [3] CIB (Conseil International du Bâtiment) W14 Workshop „Structural Fire Safety“ A Conceptual Approach Towards a Probability Based Design Guide on Structural Fire Safety. Fire Safety Journal. Volume 6. Nr. 1. 1983. Elsevier Sequoia S.A.; Lausanne.
 - [4] Wiggs, R.: BOMA International Office Building. Fire Survey, Skyscraper Management, 59(6), 1973.
 - [5] Lie, T.T.: Safety Factors for Fire Loads. Canadian Journal of Civil Engineering Vol. 6. Nr. 4 Dec. 1979.
 - [6] Landesamt für Brand- und Katastrophenschutz, Bayern, 1983

Tab. 1.3.2: Wahrscheinlichkeit der Brandentwicklung zum Vollbrand

| Brandbekämpfungsmaßnahme durch | Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Vollbrandes |
|--|---|
| Öffentliche Feuerwehr | 0,1 |
| Sprinkleranlage | 0,02 |
| gut ausgerüstete Werksfeuerwehr in Verbindung mit Brandmeldeanlage | $\geq 0,01 \div 0,001$ |
| Sprinkleranlage und gut ausgerüstete Werksfeuerwehr | $\geq 0,0001$ |

Das in einem Gebäude vorhandene Risiko hängt von der Bauklasse (z.B. ein- oder mehrgeschossig), seiner Nutzung (z.B. Industriebau, Krankenhaus, Altersheim) sowie von der Personenbelegung ab.

Das Grenzkrisiko ist von den vorgegebenen Schutzzielen abhängig:

erforderlicher Personenschutz

erforderlicher Sachwertschutz bezüglich

- des Gebäudeinhaltes (z.B. Gebäudeinhalt ersetzbar/nicht wieder ersetzbar)
- einer Betriebsunterbrechung
- der Nachbarschaft
- der Gebäudesubstanz

Brandschutzüberlegungen können jedoch nicht generell zu einer Maximierung der Maßnahmen führen, sondern sollten aufgrund einer „Optimierung“ (Brandschutz nach Maß) den jeweiligen Verhältnissen und Randbedingungen angepaßt werden.

2 Grundlagen des vorbeugenden Brandschutzes

2.1 Bauplanung - Interessen und Aufgaben

Bauherr - Architekt, Planer - Baubehörde

Im Rahmen der Bauplanung ist der vorbeugende Brandschutz ein wesentlicher Faktor. Die Aufgaben und Interessen der beteiligten Behörden, Architekten oder Planer und des Bauherrn sind dabei zu beachten und eventuell auszugleichen. Grundsätzlich umfaßt diese Aufgabe folgende Teilbereiche:

a) Interesse des Bauherrn

- 1) Bestimmte wirtschaftliche Nutzung des Bauwerkes
- 2) Geldmittel müssen ausreichen
- 3) Besondere gestalterische Vorstellungen

b) Aufgabe des Architekten oder Planers

- 1) Bauwerk nach Vorstellungen des Bauherrn entwerfen
- 2) Bau gestalten, harmonische Formen und ästhetische Linien verwirklichen
- 3) Rahmen der verfügbaren Geldmittel nicht überschreiten
- 4) Beachtung des Baurechts

c) Aufgabe der Baubehörde:

- 1) Prüfung des Bauvorhabens hinsichtlich öffentlicher Belange, Gefährdung der öffentlichen Sicherheit oder Ordnung, Leben und Gesundheit, berechtigten Anliegen des Nachbarn
- 2) Anwendung des Baurechts als Maßstab für Forderungen

2.2 Baurecht - Sicherheitsrecht

a) Rechtsvorschriften

- 1) Gesetze (z.B. Bauordnung)
- 2) Rechtsverordnungen

b) Sonstige Vorschriften und Bestimmungen

- 1) Richtlinien
- 2) Techn. (Bau-) Bestimmungen (DIN-NORMEN)
- 3) Erlasse
- 4) Verfügungen
- 5) Unfallverhütungsvorschriften (UVV)
- 6) ÖVE - Bestimmungen
- 7) Merkblätter des Verbandes der Sachversicherer

2.3 Bautechnische Brandschutzplanung

a) Bebauungsplan

- 1) Bauweise, offen oder geschlossen
- 2) Art der baulichen Nutzung des Baugebietes (z.B. Kleinsiedlungs-, Wohn-, Gewerbe- oder Industriegebiet)
- 3) zulässiges Maß der baulichen Nutzung (z.B. Zahl der Vollgeschosse)

b) Bauzeichnungen

- 1) Die Grundrisse aller Geschosse und des nutzbaren Dachraumes mit Angaben der vorgesehenen Nutzung der Räume und mit Einzeichnung:
 - der Kamine,
 - der Feuerstätten und ihrer Art
 - der ortsfesten Behälter für brennbare Flüssigkeiten
 - der Aufzugs-, Lüftungs- und Abfallschächte.
- 2) Die Schnitte, aus denen die Geschoßhöhen, die lichten Raumhöhen und der Verlauf der Treppen und Rampen ersichtlich sind, mit dem Anschnitt des vorhandenen und des künftigen Geländes.
- 3) Die Ansichten der geplanten baulichen Anlagen und evtl. der anschließenden Gebäude.
- 4) Die Maße und die verwendeten Baustoffe und Bauarten.
- 5) Bei Änderung baulicher Anlagen, die zu beseitigenden und die neuen Bauteile.

c.) Baubeschreibung

- 1) Angaben, die nicht aus den Bauzeichnungen zu ersehen sind und die Konstruktion und Nutzung erläutern
- 2) Betriebsbeschreibung
 - * Art der gewerblichen Tätigkeit
 - * Art, Zahl und Aufstellungsort von Maschinen oder Apparaten
 - * Art der zu verwendenden Rohstoffe und Erzeugnisse sowie deren Lagerung
 - * Zahl der Beschäftigten

d.) Ergänzende Nachweise und Detailpläne für die Beurteilung des Brandschutzes

- 1) Brauchbarkeitsnachweise für Bauteile (Prüfungszeugnis, Gutachten)
- 2) Projektierungspläne für:
 - * Belüftung
 - * Klimatisierung
 - * Heizung
 - * Rauch - und Wärmeabfuhr
 - * ortsfeste Löschanlage
 - * Feuermeldeanlage
 - * Wasserversorgung
 - * Installation von Löscheinrichtungen
 - * Bestuhlungs- und Einrichtungspläne

e) Brandschutz der Gemeinde

- 1) Stärke und Ausrüstung der Feuerwehr
- 2) Anmarschwege der Feuerwehr
- 3) Löschwasserversorgung
- 4) Feuermelde- und Alarmeinrichtungen

Das nachstehende Bearbeitungsschema nach Abbildung 2-1 zeigt die einzelnen Schritte der brandschutztechnischen Vorplanung eines Bauvorhabens bis rein zur Erstellung eines vollständigen Brandschutzverfahrens.

BEARBEITUNGSSCHEMA

Für die Erstellung eines Brandschutztechnischen Gutachtens

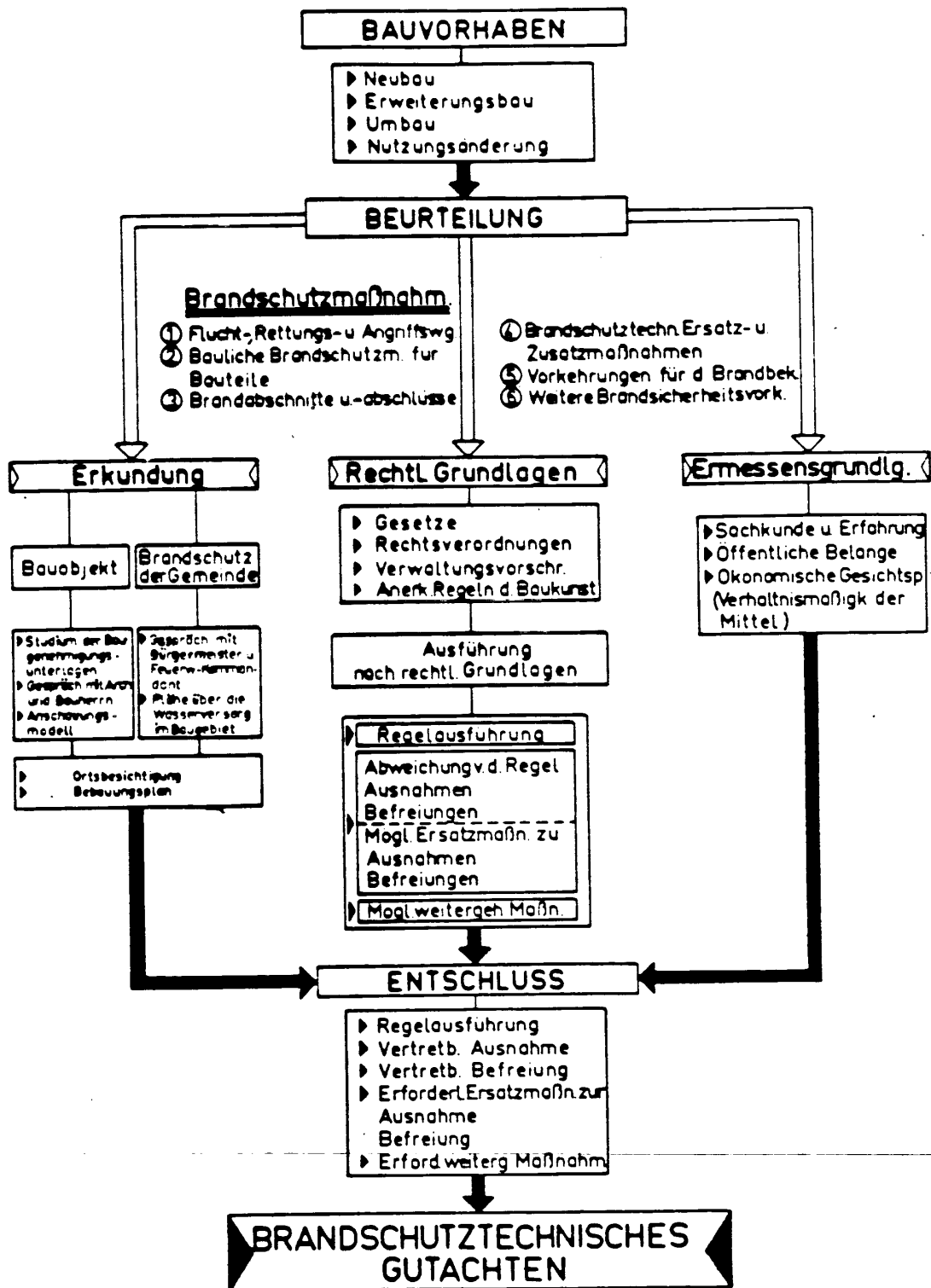


Abbildung 2.1.1: Planungsablauf für die Erstellung eines brandschutztechnischen Gutachtens

3 Der Brand

3.1 Einführung

Der Brand ist laut den "Technischen Richtlinien der österreichischen Brandverhütungsstellen (TRVB 101)" folgendermaßen definiert:

"Unter Brand versteht man ein Feuer, das auf keinem bestimmungsmäßigen Herd entstanden ist oder sich über diesen hinaus ausbreitet und Sachschaden verursacht hat, wobei Feuer als äußere Erscheinungsform der Verbrennung definiert ist."

Die Brandlehre (siehe Kapitel 3.3) die sich mit diesem nicht bestimmungsgemäßen Brennen - also dem Schadenfeuer - befaßt, weicht insofern von den ingenieurmäßig gelehrt Disziplinen Haus- und Feuerungstechnik, Energieversorgung usw. ab, als sie sich nicht mit der Nutzanwendung der Verbrennung (Nutz-, oder Zweckfeuer) - also dem bestimmungsmäßigen Brennen - beschäftigt. Jedoch sind die chemischen und physikalischen Voraussetzungen und Begleiterscheinungen für beide Arten des Brennens gleich.

Hinsichtlich der äußeren Erscheinungsform eines Brandes unterscheidet man zwischen Flammbrand und Glutbrand. Der Unterschied liegt darin, daß der Flammbrand bei einer Verbrennung von Gasen und Dämpfen, der Glutbrand bei einer Verbrennung von festen, entgasten Stoffen auftritt. Bei der Verbrennung fester Stoffe ist das Auftreten beider Brandarten möglich (Abbildung 3.1).

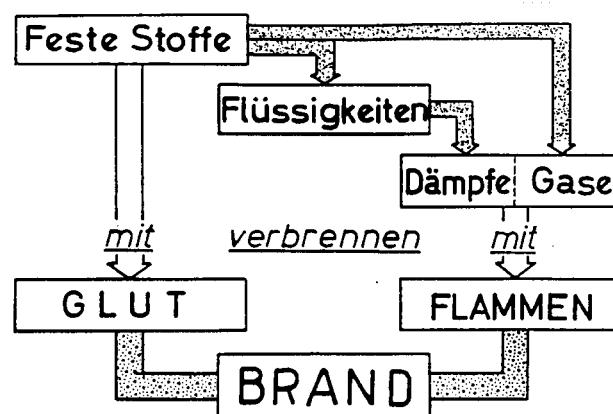


Abbildung 3.1: Erscheinungsformen von Bränden

3.2 Brandentstehung und Brandausbreitung

3.2.1 Bedingungen für die Brandentstehung

Es müssen bestimmte Voraussetzungen für eine Brandentstehung bzw. für eine Brandausbreitung vorhanden sein. Diese Voraussetzungen können in zwei Gruppen unterteilt werden:

a) stoffliche Voraussetzungen

b) energetische Voraussetzungen

Betrachtet man die stoffliche (materielle) Seite, so ist das gleichzeitige Auftreten folgender drei Bedingungen ausschlaggebend für das Zustandekommen und für die Ausbreitung eines Brandes, d.h. folgende Bedingungen müssen mindestens erfüllt sein (siehe Abbildung 3.2):

- **brennbarer Stoff** mit entsprechender Entzündbarkeit. Die Verbrennung kann nur ablaufen, wenn genügend brennbarer Stoff in einer für die Verbrennung geeigneten Form vorhanden ist.
- **Sauerstoff** (meist ein Bestandteil der umgebenden Luft), der Zugang zu dem entzündbaren Stoff hat. Sauerstoff ist das Oxidationsmittel der Verbrennung. Er muß also in ausreichender Menge vorhanden sein.
- **richtiges Mengen- bzw. Mischungsverhältnis** zwischen brennbarem Stoff und Sauerstoff. Dieses günstige Mengenverhältnis ist abhängig von der Art des brennbaren Stoffes.

Neben diesen stofflichen Voraussetzungen der Verbrennung - das Vorhandensein von brennbarem Stoff und Sauerstoff im richtigen Mengenverhältnis - ist ein Brennen nur dann möglich, wenn gleichzeitig die energetischen Voraussetzungen erfüllt sind. Diese betreffen das Einleiten der Verbrennung (Entzünden) und die Unterhaltung der Verbrennung dafür sind folgende Voraussetzungen erforderlich:

a) Zündtemperatur

b) Mindestverbrennungstemperatur

Damit es zum Brennen kommt, bedarf es eines energetischen Anstoßes, d.h., es muß genügend Zündenergie, z.B. durch das Zünden einer geeigneten Zündquelle,

zugeführt werden. Zur Abschätzung der erforderlichen Zündenergie gibt man die Temperatur an, auf die das Gemisch aus brennbarem Stoff und Sauerstoff zur Einleitung des Brennens gebracht werden muß. Diese Temperatur bezeichnet man als Zündtemperatur. Ist nun die Verbrennung infolge Erreichens oder Überschreitens der für den entzündbaren Stoff charakteristischen Zündtemperatur durch Aufnahme von Wärme eingeleitet, so ist eine Mindestenergie notwendig, damit die Verbrennung selbständig weiterläuft. Zur Abschätzung dieser Energie gibt man die Mindestverbrennungstemperatur an, bei der das Brennen gerade noch möglich ist.

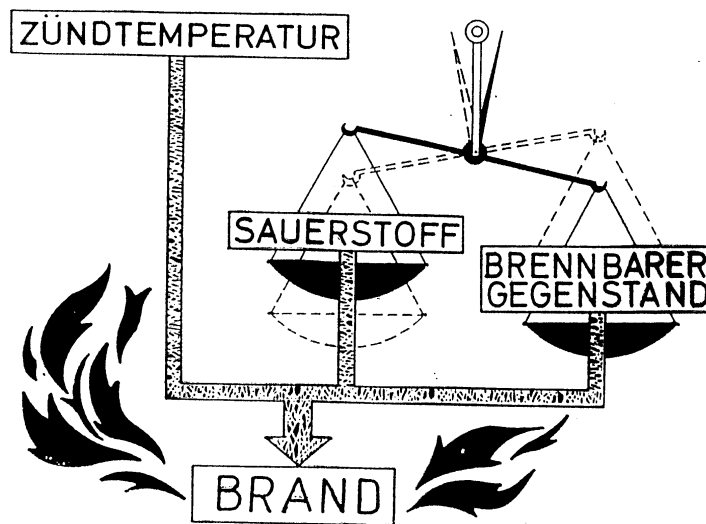


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der für eine Brandentstehung notwendigen Voraussetzungen

Die oben genannten Voraussetzungen müssen gleichzeitig erfüllt sein, um eine Brandentstehung zu verursachen und einen Brand aufrecht zu halten. Bei Fehlen nur einer dieser Voraussetzungen ist ein Brand unmöglich.

3.2.2 Zündtemperatur und Mindestverbrennungstemperatur

Die **Zündtemperatur** ist die niedrigste, unter festgelegten Bedingungen ermittelte Temperatur, bei der sich ein brennbarer Stoff in Luft entzündet. Für kompakte feste Stoffe gibt es zur Zeit kein allgemein gültiges Normverfahren zur Bestimmung der Zündtemperatur, da die Vorgänge beim Entzünden sehr komplex sind. So laufen z.B. bei Holz, Kohle, Papier, Kunststoffe usw. bereits schon unterhalb der Zündtemperatur Zersetzungsprozesse ab, bei denen brennbare Stoffe (Pyrolysegase) entstehen. Obwohl bei Gas/Luft-Gemischen die Vorgänge beim Entzünden einfacher verlaufen, sind auch hier die Mechanismen noch nicht eindeutig geklärt. In Tabelle 3.1 sind die Zündtemperaturen verschiedener Stoffe angegeben.

Tabelle 3.1: Zündtemperatur brennbarer Stoffe mit Pilotflamme

| Stoff (flüssig) | Temperatur (°C) | Stoff (fest) | Temperatur (°C) |
|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|
| Azeton | 540 | Braunkohle | 250-280 |
| Benzin | 470-530 | Holz | 220-320 |
| Gasöl | 350-400 | Koks | 500-640 |
| Schmieröl | 510-610 | Papier | 360 |
| Spiritus | 425-650 | PMMA | 270 |
| Terpentinöl | 275 | PVC | 220-350 |

Für die Entzündung ist neben einer ausreichenden Oberflächentemperatur eine bestimmte Höhe der Wärmeeinstrahlung auf die Oberfläche erforderlich. In Tabelle 3.2 sind beispielhaft brennbare Stoffe und die zugehörigen Entzündungskriterien zusammengestellt.

Tabelle 3.2: Entzündungskriterien für brennbare Stoffe mit/ohne Pilotflamme

| Stoff | Wärmestrom für die Entzündung [kW/m ²] | | Oberflächentemperatur für die Entzündung [°C] | |
|----------------------|---|---------|---|---------|
| | Pilotflamme | spontan | Pilotflamme | spontan |
| Holz | 12 | 28 | 220-350 | 600 |
| Spanplatte | 18 | - | 240-350 | - |
| Preßspanplatte | 27 | - | 280-350 | - |
| PMMA | 21 | - | 270 | - |
| PVC | 25 | 30-50 | 220-350 | 340-520 |
| PU-weich | 16 | - | 270 | - |
| POM | 17 | - | - | - |
| PM | 12 | - | - | - |
| PE | 22 | - | - | - |
| Sperrholz | 20 | - | 393 | - |
| Melamin-Beschichtung | 25 | - | 440 | - |
| B1-Spanplatte | 17 | - | 353 | - |
| PVC-Beschichtung | 12 | - | 284 | - |
| FR-PS Schaum | 14.8 | - | 326 | - |

Da in der Praxis die Zündtemperatur zur Beurteilung der Zündgefahr jedoch nicht ausreicht, muß auch die Mindestzündenergie berücksichtigt werden. Sie wird herangezogen zur Beurteilung, ob eine explosionsfähige Atmosphäre durch die zeitlich begrenzte Einwirkung einer Zündquelle, wie z.B. Funkenentladung, zur Zündung gebracht werden kann.

Neben der Zündtemperatur, die für das Einleiten der Verbrennung, dem Entzünden, ausschlaggebend ist, wird für das selbständige Brennen eine **Mindestverbrennungstemperatur** benötigt. Die Mindestverbrennungstemperatur kennzeichnet den Reaktionszustand eines Systems, bei dem die Reaktionswärme gerade noch ausreicht, um den Energiekreislauf unter Berücksichtigung der Wärmeverluste zu schließen (Abbildung 3.3).

Zunächst wird durch die Zufuhr von Zündenergie der brennbare Stoff aufbereitet, das System aktiviert und die Reaktionsgeschwindigkeit so weit gesteigert, bis das System durch eigene Energieproduktion ein selbständiges Brennen ermöglicht, d.h., daß ab Erreichen der Mindestverbrennungstemperatur das System genügend Energie produziert, um die weitere Aufbereitung der brennbaren Stoffe, die Reaktionsaktivierung sowie die Wärmeverluste an die Umgebung selbst zu decken. Eine weitere Energiezufuhr von außen ist nicht mehr notwendig. Die Mindestverbrennungstemperaturen liegen daher zum Teil erheblich über den Zündtemperaturen.

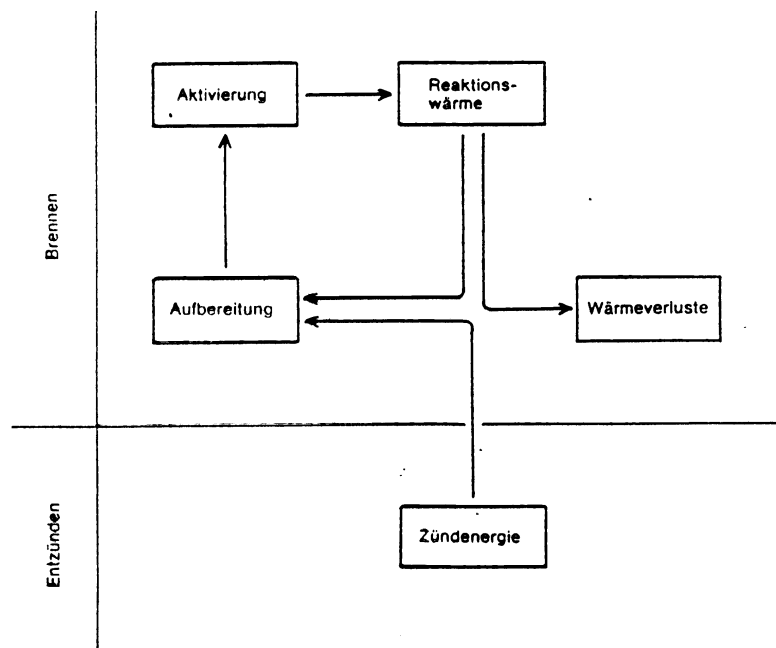


Abbildung 3.3: Energiekreislauf der Verbrennung

Aufgrund der überschüssigen Reaktionswärme, die für Aufbereitung und Aktivierung nicht verbraucht wird, steigt die Temperatur im System selbständig weiter auf die **Brandtemperatur**, welche letztendlich als Flammentemperatur oder auch als Brandraumtemperatur interpretiert wird.

3.3 Chemisch - Physikalische Vorgänge

3.3.1 Allgemeines

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

1. der **chemischen Grundlagen** der Verbrennung,
2. der **physikalischen Grundlagen** der Verbrennung und
3. des **Verbrennungsvorganges**

ist Gegenstand der Fachdisziplinen "Brandlehre" bzw. „Wärme- und Brennstofftechnik“ und kann hier nicht behandelt werden.

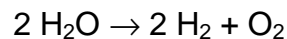
Die Verbrennung ansich ist ein chemischer und physikalischer Vorgang, wobei

- die **Physik** die Lehre von den Zuständen und den Zustandsänderungen der Materie,
- die **Chemie** die Lehre von den stofflichen Eigenschaften der Materie und den Stoffänderungen ist.

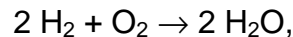
Der Unterschied zwischen physikalischen und chemischen Vorgängen zeigt sich sehr gut am Beispiel des Verhaltens von Wasser (H_2O):

Wasser kann je nach Temperatur und Druck in drei Erscheinungsformen (Aggregatzuständen) auftreten. Bei Normaldruck ist es unterhalb von $0^{\circ}C$ fest (Eis), im Bereich von $0^{\circ}C$ bis $100^{\circ}C$ flüssig (Wasser) und oberhalb von $100^{\circ}C$ gasförmig (Wasserdampf). Die Änderung des Aggregatzustandes ist ein rein physikalischer Vorgang, da sich nur der Zustand des Stoffes, nicht aber der Stoff selbst ändert. Wasser (H_2O) ist also in allen drei Aggregatzuständen chemisch der gleiche Stoff.

Erfolgt hingegen eine Wasserelektrolyse, so entstehen aus dem Molekül H_2O nach der Gleichung



zwei Wasserstoffmoleküle und ein Sauerstoffmolekül. Dies ist ebenso ein chemischer Vorgang wie die Umkehrung dieser Gleichung



die für die Verbrennung des Wasserstoffes mit Sauerstoff zum Wasser gültig ist. In beiden Fällen sind chemische Vorgänge - also stoffliche Umwandlungen - eingetreten.

Aufgabe der Brandlehre ist nun die kinetische und thermodynamische Beschreibung der stofflichen Umwandlungen, die sich bei der Verbrennung vollziehen. Der dabei einhergehende Energieaustausch gehört in den Bereich der Physik und wird in der Brandlehre insoweit behandelt, wie es zum Verständnis der Einleitung und des Fortschreitens der Verbrennung sowie der Wirkungen und Ausbreitungsmöglichkeiten der Wärme und Brandgase notwendig ist.

3.3.2 Der Verbrennungsvorgang

Anfänglich wurde angenommen, daß brennbare Stoffe einen "Feuerstoff" (Phlogiston) enthalten, der bei der Verbrennung entweicht (Stahl 1722). Das resultierte aus der Beobachtung, daß brennbare Stoffe infolge der entwickelten Verbrennungsprodukte leichter werden. Die unterschiedliche Brennbarkeit von Stoffen erklärte man mit einem unterschiedlichen Gehalt an Phlogiston. Beim Löschen mit Wasser würde man ein Freisetzen des Phlogiston verhindern.

Erst vor gut 220 Jahren entdeckten Priestley und Scheele 1774 den Sauerstoff, den man zunächst als "*Feuerluft*" bzw. "*dephlogisierte Luft*" deutete. Kurz später erkannte der Chemiker Lavoisier, daß es sich beim Sauerstoff um ein Element handelt, das zu 21 Vol.-% in der Luft vorkommt. Er nannte das Gas "**Oxygène**".

Trotz dieser grundlegenden Entdeckungen dauerte es jedoch noch viele Jahre, bis man zu der heutigen Deutung der Verbrennungsvorgänge kam.

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 weiters 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, das 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, 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) verbraucht, und es entstehen neue feste und gasförmige Verbrennungsprodukte. Feste Verbrennungsprodukte sind überwiegend unschädliche anorganische Anteile bzw. nicht verbrannte Kohlenstoffe. Als gasförmige Verbrennungsprodukte (Rauchgase) können neben Wasserdampf (H_2O) und nicht giftigem, aber erstickend wirkendem Kohlendioxyd (CO_2) auch Atemgifte wie Kohlenmonoxyd (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 Wärmezufuhr eine

- Änderung der Aggregatzustände,
- Änderung der Temperatur,
- Ausdehnung der Stoffe,
- Änderung der Festigkeit erfolgt.

Um den Aggregatzustand von Stoffen zu ändern, ist eine bestimmte Wärmemenge nötig. Diese Wärmemenge ändert nicht die Temperatur des Stoffes, sondern wird nur zur Umwandlung des Aggregatzustandes verbraucht. Ist die Umwandlung des Aggregatzustandes abgeschlossen, so erhöht sich die Temperatur des Stoffes, bis schließlich der Zündpunkt (Zündtemperatur) erreicht ist. Die für die Brandentstehung erforderliche Wärme wird entweder von außen zugeführt (Fremdzündung), kann aber auch im brennbaren Stoff selbst durch den Ablauf physikalischer, chemischer oder biologischer Vorgänge (Selbsterhitzung, -zündung) erfolgen.

Neben diesen Wirkungen der Wärme besitzen Stoffe die Fähigkeit Wärme durch

- Wärmeleitung,
- Konvektion und
- Wärmestrahlung

zu transportieren. Alle drei Effekte spielen bei dem Verlassen von Stoffen, bei der Brandentwicklung und Ausbreitung sowie bei den Auswirkungen des Brandes im Gebäude 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.

Viele in der Natur vorkommende, aber auch künstlich hergestellte Stoffe weisen einen sehr komplexen Aufbau auf. Die Vorgänge bei der Verbrennung dieser Stoffe sind sehr kompliziert und zum Großteil noch ungeklärt. Zu diesen Stoffen zählen u.a. Holz, Papier, Kohle sowie die natürlichen und synthetischen hochmolekularen Verbindungen der Eiweißstoffe, Faserstoffe und Kunststoffe.

In der Praxis werden daher die brennbaren Stoffe in Brandklassen (Abb. 5.4) eingeteilt. Dieses ist eine verhältnismäßig grobe Klassifizierung von Stoffen in Gruppen, die im wesentlichen das gleiche Brandverhalten zeigen. Sie dient dazu, bestimmten Gruppen von Stoffen geeignete Löschmittel zuordnen zu können.





| Klasse | Art der Brände | Bildzeichen |
|--------|---|--|
| A | Brände fester Stoffe, hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Glutbildung verbrennen |  |
| B | Brände flüssiger oder flüssig werdender Stoffe |  |
| C | Brände von Gasen |  |
| D | Brände von Metallen |  |

Abbildung 3.4: Brandklasseneinteilung nach DIN EN 2 - Bildzeichen nach DIN 14406 / Bl.1

3.3.3 Kalorische Daten brennbarer Stoffe

Die in den einzelnen Brandphasen auftretenden Brandleistungen sind sehr unterschiedlich. Für die Entzündung sind nach Tab. 2.3 Brandleistungen um 25 kW/m²

erforderlich. Schwelbrände laufen i.a. bei Leistungen kleiner 50 kW/m^2 ab, wohingegen bei vollentwickelten Bränden die Brandleistungen bis über 1000 kW/m^2 ansteigen können. Entscheidend für die Brandleistung ist die Art des brennbaren Stoffes, dessen Heizwert und der Luftbedarf des Stoffes. In den nachstehenden Tabelle 3.3, 3.4, 3.5 und 3.6 sind die kalorischen Daten von brennbaren Stoffen auszugsweise zusammengestellt.

Tabelle 3.3: Heizwert und Luftbedarf von brennbarer Gase

| Gas | Heizwert kWh/kg | Luftbedarf kg L/kg | Energie/Luftmenge kWh/kg L |
|-------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Acetylen | 13.4 | 13,2 | 1.014 |
| Butan | 12.9 | 15.6 | 0.825 |
| CO | 2.8 | 2.5 | 1.139 |
| Ethan | 13.2 | 16.1 | 0.822 |
| Methan | 13.9 | 17.2 | 0.808 |
| Propan | 12.8 | 15.5 | 0.825 |
| Wasserstoff | 33.6 | 34.5 | 0.977 |

Tabelle 3.4: Heizwert und Luftbedarf von brennbarer Flüssigkeiten nach
/L/2/ und /L/5/

| Flüssigkeit | Heizwert kWh/kg | Luftbedarf kg L/kg | Energie/Luftmenge kWh/kg L |
|-------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Azeton | 8.6 | 9.5 | 0.903 |
| Benzol | 11.1 | 13.2 | 0,842 |
| Benzin | 11.9 | 13.5 | 0.884 |
| Chlorbenzol | 11.2 | 12.9 | 0.852 |
| Ethanol | 7.4 | 8.9 | 0.831 |
| Erdöl | 11.6 | 13.0 | 0.855 |
| Glycol | 4.6 | 5.4 | 0.890 |
| Heizöl EL | 11.7 | 13.1 | 0.898 |
| Hydrauliköl | 9.8 | 10.9 | 0.831 |
| Isopropanol | 7.5 | 9.0 | 0.853 |
| Methanol | 5.5 | 6.4 | 0.825 |
| n-Pentan | 12.6 | 15.3 | 0.825 |
| n-Oktan | 12.4 | 15.0 | 0.825 |
| c-Hexan | 12.2 | 14.8 | 0.825 |
| Petroleum | 12.1 | 13.6 | 0.890 |
| Terpentin | 11.5 | 12.9 | 0.890 |
| Xylol | 11.1 | 12.5 | 0.890 |

Tabelle 3.5: Heizwert und Luftbedarf fester Stoffe (ohne Kunststoffe) nach /L/2/ und /L/5/

| Feststoff | Heizwert kWh/kg | Luftbedarf kg L/kg | Energie/Luft kWh/kg L*) |
|---------------|--------------------|-----------------------|----------------------------|
| Autoreifen | 12.2 | 13.6 | ~ 0.9 |
| Baumwolle | 4.3 | 4.8 | ~ 0.9 |
| Braunkohle | 5.8 | 6.4 | ~ 0.9 |
| Brechkoks | 8.1 | 9.0 | ~ 0.9 |
| Bitumen | 9.8 | 10.9 | ~ 0.9 |
| Dachbahn | 8.0 | 8.9 | ~ 0.9 |
| Holz | 4.8 | 5.2 | 0.930 |
| Holzmöbel | 4.8 | 5.2 | ~ 0.9 |
| Holzkohle | 9.1 | 11.5 | ~ 0.9 |
| Kautschuk | 11.7 | 13.0 | ~ 0.9 |
| Karton, Pappe | 4.2 | 4.7 | ~ 0.9 |
| Korbwaren | 4.8 | 5.3 | ~ 0.9 |
| Leder | 5.3 | 5.9 | ~ 0.9 |
| Margarine | 9.0 | 10.0 | ~ 0.9 |
| Papier | 3.8 | 4.2 | ~ 0.9 |
| Putzlappen | 8.8 | 9.8 | ~ 0.9 |
| Roggenmehl | 4.6 | 5.1 | ~ 0.9 |
| Sanitärcrepp | 3.7 | 4.1 | ~ 0.9 |
| Spanplatten | 4.8 | 5.3 | ~ 0.9 |
| Steinkohle | 9.3 | 11.4 | 0.814 |
| Teppichfilz | 6.0 | 6.7 | ~ 0.9 |
| Tonkassetten | 6.0 | 6.7 | ~ 0.9 |
| Zucker | 4.6 | 5.1 | ~ 0.9 |

*) Für Kohlenwasserstoffverbindungen gilt als guter Näherungswert: 0,9 kWh/kg L.

Kalorische Daten dieser Art werden benötigt, um im Rahmen theoretischer Untersuchungen vorab Aussagen zu gewinnen den Brandverlauf in Gebäuden oder Räumen. Dabei geht es darum, auf der Grundlage von Wärme- und Massebilanzen den Brandablauf, z.B. die Temperatur- und Rauchentwicklung im Gebäude und die Temperaturbeanspruchung der Konstruktion rechnerisch zu ermitteln, um so die Gefährdung von Personen und Sachgütern theoretisch vorhersagen zu können.

Tabelle 3.6: Heizwert und Luftbedarf von Kunststoffen nach /L/2/, /L/5/ und /L10/

| Kunststoff | Heizwert kWh/kg | Luftbedarf kg L/kg | Energie/Luft kWh/kg L |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| Acrylnitril | 8.9 | 9.7 | 0.917 |
| Cellulose | 4.9 | 5.1 | 0.953 |
| Melamin | 5.4 | 6.4 | 0.840 |
| Nylon 6.6 | 8.2 | 10.0 | 0.817 |
| PMMA | 6.9 | 8.3 | 0.836 |
| Polyamid | 7.9 | 8.9 | 0.884 |
| Polycarbonat | 8.3 | 9.8 | 0.844 |
| Polyester | 7.6 | 8.5 | 0.890 |
| Polyesterharz (GFK) | 5.3 | 6.0 | 0.890 |
| Polyethylen | 12.2 | 15.0 | 0.814 |
| Polyoxymethylen | 4.3 | 4.6 | 0.933 |
| Polypropylen | 12.2 | 15.0 | 0.814 |
| Polystyrol | 11.1 | 13.3 | 0.836 |
| Polyvinylchlorid | 5.0 | 6.0 | 0.828 |
| Polyethylenterephthalat | 6.1 | 7.2 | 0.850 |
| Polytetrafluorethylen | 1.4 | 2.8 | 0.503 |
| PU-hart | 6.7 | 7.5 | 0.894 |
| PU-weich | 6.4 | 7.2 | 0.894 |
| PVC-Kabel | 5.0 | 6.0 | 0.828 |

Aus den vorstehenden Tabellen geht eine sehr wichtige und für praktische Zwecke bedeutsame Eigenschaft der brennbaren Stoffe hervor. Die pro freigesetzte Kilowattstunde theoretisch benötigte Luftmenge liegt bei Gasen zwischen 0.8 und 1.0 kg Luft, bei Flüssigkeiten zwischen 0.8 und 0.9 sowie bei Kunststoffen zwischen 0.82

und 0.95 kg Luft. Für Feststoffe kann im Mittel mit 0.9 kWh/kg Luftmenge gerechnet werden. Damit ist es leicht möglich, bei rechnerischen Untersuchungen festzustellen, ob das Brandgeschehen brandlastgesteuert (Luftüberschuß) oder ventilationsgesteuert (Luftunterschuß) abläuft, d.h. bei Kenntnis der Strömungsverhältnisse (Luftzufuhr und Rauchgasabfuhr) läßt sich abschätzen, welche Luftmenge für eine stöchiometrische Verbrennung des betreffenden Stoffes überhaupt zur Verfügung steht. Entsprechend dieser Menge sind Abbrandgeschwindigkeit und Energiefreisetzung des Brandgutes begrenzt.

3.4 Zeitlicher Ablauf von Schadenfeuern

3.4.1 Natürlicher Ablauf von Bränden

Die Entwicklung eines Schadenfeuers hängt unter anderen ab von der Art der brennbaren Stoffe, der Zündquelle, der Verteilung der Brandlast, der Ventilation des betroffenen Raumes, den verwendeten Baustoffen, dem Verhalten der betroffenen Personen, usw. .

Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter ist es praktisch unmöglich, das zu erwartende reale Schadenfeuer theoretisch exakt vorherzubestimmen. Aus diesem Grunde ist es im Rahmen der Ingenieurmethoden zum Nachweis ausreichender Brandsicherheit üblich geworden, sogenannte Bemessungsbrände (Design fires) und Bemessungsszenarien (Design fire scenarios) zu definieren und anzuwenden.

Ausgehend von der Überlegung, daß die Bestimmung eines Brandablaufes unter komplexen Randbedingungen ehestens für die Rekonstruktion von Schadenfeuern von Bedeutung sind, ist die Festlegung eines repräsentativen Bemessungsbrandes für den Brandschutzentwurf geeignet, wenn dieser eine ausreichende Brandsicherung ergibt.

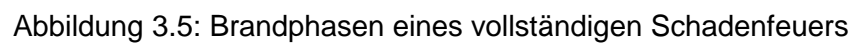
Prinzipiell sollten bei einem anwendungsorientierten Brandschutzentwurf beide Möglichkeiten offen bleiben. Das Bemessungsbrandkonzept ist jedoch von Vorteil, weil es zu einem vergleichsweise einfachen Vorgehen führt.

Wichtig ist dabei, daß bei einem unterstellten Feuer die zu erwartenden Temperatur- oder Rauchentwicklungen und eventuell toxischen bzw. korrosiven Gase *auf der sicheren Seite liegend* berechnet werden. Dabei ist das Zusammenwirken aller Räume im Gebäude zu berücksichtigen.

Der typische Verlauf eines Schadenfeuers ist auf Abbildung 3.5 angegeben.

Vier bestimmte Brandphasen werden unterschieden (siehe Tabelle 3.7):

| Brandphase | Temperaturbereich in °C | Brandleistung in kW/m² |
|-------------|-------------------------|------------------------|
| Entzündung | 20-50 | < 25 |
| Schwelen | 50-150 | 25-50 |
| Ausbreitung | 500-1250 | 50-1200 |
| Abklingen | 500-20 | < 200 |



Entsprechend dem jeweiligen Schadenfeuer können diese Phasen unterschiedlich lang sein bzw. u.U. gar nicht auftreten. So kann die Schwelbrandphase wenige Minuten oder viele Stunden dauern.

Die Fortentwicklung des Brandes kann wenige Minuten nach der Entzündung oder erst im späten Brandstadium erfolgen.

Bei Temperaturen von 500-600° C unterhalb der Decke eines vom Brand betroffenen Raumbereiches ist eine schlagartige Brandausbreitung mit ca. 5,0 m/min. (Flash-over) zu erwarten.

Entsprechend der Materialart der Baustoffe (Baustoffklasse, Oberflächenbeschaffenheit, Beschichtung) und den vorherrschenden Temperaturen kommt es zur Entzündung der oder des beteiligten Stoffe/s.

Die Vorgänge beim Entzünden brennbarer Stoffe, insbesondere hochmolekularer Kunststoffe, Holz oder Papier sind sehr komplex, sodaß es keine einfachen Beziehungen oder Verfahren zur Bestimmung der Zündtemperaturen gibt.

Die Zündtemperaturen hängen ab :

- vom Temperaturniveau der Umgebung
- vom Strahlungsaustausch bzw. von dem einwirkenden Wärmefluß
- von der Dauer der thermischen Aufbereitung
- vom Vorhandensein einer Pilotflamme

Entsprechend dem typischen Brandablauf nach Bild 1-1 ergeben sich für den brand-schutztechnischen Entwurf unterschiedliche Brandszenarien, welche zeitlich gesehen ggf. miteinander verknüpft sind:

- Entzündung
- Verschmelzung
- Ausbreitung
- Vollbrand
- Brandmeldung
- Brandlöschung
- Flucht und Rettung

Entsprechend der jeweils vorliegenden Fragestellung sind ein oder mehrere Szenarien zusammengefaßt als *Bemessungsbrandszenarium* im Rahmen des Brandschutzkonzeptes zu behandeln.

Da es i.A. nicht möglich oder zu aufwendig ist, jedes Szenarium separat zu behandeln, wird in der Praxis bevorzugt von *Entwurfbrandszenarien* ausgegangen. Diese liefern für die Risikobetrachtung auf der „sicheren Seite“ liegende Bewertungen und sind im übrigen einfacher zu handhaben als mehrere aufeinander aufbauende Teilszenarien.

Entscheidend ist dabei das anzunehmende Brandmodell (Abbrandmodell), das für den jeweiligen Einzelfall festzulegen ist und gewissermaßen ein abdeckendes Schadenfeuer simulieren soll.

Solche abdeckende Schadenfeuer sind in den entsprechenden Brandschutznormen (z.B. DIN 4102) als Prüfbrände festgelegt. In Einzelfällen liegen die Prüfbrände (Normbrände) allerdings weit auf der „sicheren Seite“, d.h. es werden Brände unterstellt, die in der Praxis gar nicht auftreten können, z. B. weil es an brennbaren Stoffen fehlt.

3.4.2 Berechnung des Ablaufes von 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 sowohl auf Detailprobleme, als auch auf umfassende Fragestellungen im Brandschutz:

- 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 Sprinklern
- Simulation der Evakuierung von Hochhäusern

Alle verfügbaren EDV-Programme haben ein Problem gemeinsam:

Sie müssen geeignet sein, reale Schadenfeuer theoretisch hinreichend genau zu behandeln.

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 Brandlast und der Temperatur
- Spezifische Abbrandgeschwindigkeit der brennbaren Stoffe bei gegebener Ventilation
- Luftbedarf des Brandgutes
- spezifische Verbrennungsaktivität

Soweit die Wirkung einer Sprinkelanlage 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.

Die vertikale Brandausbreitung dürfte je nach Nutzung bei 0,5-5 m/min. oder darüber liegen. In Abhängigkeit erhält man für die Energiefreisetzung (heat release rate) eines Brandes folgende Beziehung:

$$\dot{E} = \dot{R}_{sr} \cdot H_u \cdot A \cdot \chi$$

mit

\dot{E} : Brandleistung in kW

\dot{R}_{sr} : spezifische Abbrandgeschwindigkeit in kg / m²h

H_u : unterer Heizwert in kWh / kg

A: aktuelle Brandfläche in m²

χ : Verbrennungseffektivität

Die aktuelle Brandfläche bei horizontaler Ausbreitung in zwei Richtungen errechnet sich wie folgt:

$$A = X \cdot Y \quad \text{in m}^2$$

mit

$$X = a_0 + v_x \cdot t$$

$$Y = b_0 + v_y \cdot t$$

a_0 : Länge des Zündherdes in X-Richtung in m

b_0 : Länge des Zündherdes in Y-Richtung in m

V_x : Brandausbreitung in X-Richtung in m/min

V_y : Brandausbreitung in Y-Richtung in m/min

t: Branddauer in min

Es ergibt sich somit prinzipiell eine mit der Zeit quadratisch ansteigende Beziehung für die Brandleistung. Diese Beobachtung stimmt mit Beobachtungen überein. In der Literatur wird jedoch auch über exponentielle Brandausbreitungsmodelle berichtet. Die Abweichungen zu den quadratischen Modellen sind klein, d.h. für die Brandausbreitung gilt etwa:

$$\dot{E} \approx C_0 \cdot t^2 \quad \text{oder} \quad \dot{E} \approx C_1 \cdot \exp(at)$$

Tabelle 3.8: Abbrandgeschwindigkeiten für brennbare Flüssigkeiten

| Brennbare Flüssigkeit | Spez. Abbrandgeschwindigkeit in kg/m ² min | | |
|-----------------------|---|---------|--------------------------------------|
| | nach L7 | nach L8 | nach L9 |
| Azeton | 2,63 | 2,5 | --- |
| Ethylalkohol | 0,93 | 0,9 | --- |
| Methylalkohol | 0,95 | 1,0 | 2,8-3,8 |
| Butylalkohol | 0,87 | --- | --- |
| Benzin | 1,53 | 3,3 | 1,0 ^{*)} -2,1 ^{*)} |
| Reinigungsbenzin | --- | 2,9 | 0,43-1,1 ^{*)} |
| Benzol | 0,87 | 5,1 | --- |
| Cyclohexan | --- | --- | 0,51-1,4 ^{*)} |
| Dieselöl | 1,1 | 2,1 | --- |
| Erdöl | 1,2 | 1,3 | --- |
| Heizöl | 0,92 | --- | 0,43-1,7 ^{*)} |
| Isopropanol | --- | --- | 0,32-1,1 ^{*)} |
| Kerosin | 0,82 | 2,3 | --- |
| Maschinenöl | 0,67 | 3,1 | --- |
| Motorenöl | 0,55 | 3,2 | --- |
| Petroleum | 2,9 | --- | --- |
| Terpentinöl | 2,05 | 5,1 | --- |
| Toluol | 2,31 | --- | --- |
| Xylol | 1,73 | 5,4 | --- |

*): Versuche wurden bei Luftunterschuß durchgeführt.

Die Werte zeigen, daß die brennbaren Flüssigkeiten nach amerikanischen Daten L8 deutlich schärfer bewertet werden, als nach deutschen Angaben L7 und L9. Die Werte nach L9 sind teilweise offenbar deshalb so niedrig, weil die Versuche bei starkem Luftunterschuß durchgeführt wurden.

Tabelle 3.9: Abbrandgeschwindigkeiten für feste Stoffe (ohne Kunststoffe)
nach L7 und L9

| Feststoff | Abbrandgeschwindigkeit in kg/m ² min nach | |
|-------------------|--|---------------------------------------|
| | L7 | L9 |
| Autoreifen | 0,53 | 0,86 ^{*)} -1,0 ^{*)} |
| Baumwolle | 0,24 | --- |
| Baumwollstoff | 0,72 | --- |
| Bücher (Regal) | 0,33 | --- |
| Dachbahn | --- | 1,3 ^{*)} -1,8 ^{*)} |
| Gummiformteile | 0,53-0,8 | 0,7-0,86 |
| Holz | 0,67-1,0 | > 2,0 ^{*)} |
| Holzmöbel | 0,9 | 0,93-1,2 |
| Kautschuk | 0,53-0,8 | --- |
| Karton | --- | 1,3-1,5 |
| Korbwaren | --- | 1,3-2,2 ^{*)} |
| Margarine | --- | 0,38-0,5 |
| Papier | 0,4-0,48 | 1,2-1,6 |
| Putzlappen (ölig) | --- | 0,7-0,86 |
| Roggenmehl | --- | 0,54-0,6 |
| Sanitärkrepp | --- | 0,53-0,65 |
| Schuhkarton | --- | 1,3-1,7 |
| Sperrholz | --- | 0,5-0,59 |
| Teppichfilz | --- | 0,35-1,2 |
| Torf | 0,18-0,32 | --- |
| Tonkassetten | --- | 0,29-0,57 |
| Textilabfall | 0,25-1,04 | --- |

^{*)}: Versuche wurden bei Luftunterschuß durchgeführt.

Tabelle 3.10: Abbrandgeschwindigkeiten von Kunststoffen nach L2, L8 und L9

| Kunststoff | Abbrandgeschwindigkeit in kg/m ² min nach | |
|-------------------------|--|-------------|
| | L2 und L8 | L9 |
| Acrylnitril | --- | --- |
| Cellulose | --- | --- |
| Melamin | --- | --- |
| Nylon 6.6 | --- | --- |
| PMMA | 0,6-1,4 | --- |
| Polyamid | --- | 0,39-0,504 |
| Polycarbonat | 1,5 | --- |
| Epoxiharz | --- | 0,45-0,534 |
| Polyesterharz | 0,54-1,0 | --- |
| Polyethylen | 0,84 | 0,408-0,522 |
| Polyethylen Formteile | --- | 0,414-0,648 |
| Polypropylen | 0,504-0,84 | 0,174-0,462 |
| Polyoxymethylen | 0,384-0,96 | --- |
| Polystyrol | 0,846-2,1 | 0,348-0,408 |
| Polyvinylchlorid, weich | --- | 0,552-0,72 |
| PU-hart | 1,6-2,7 | 0,552-0,72 |
| PU-weich | 0,492-1,9 | 1,2-1,5* |
| PVC-Kabel | 1,0-1,3 | 0,576-0,684 |

*: Versuche wurden bei Luftunterschuß durchgeführt.

Aus den Tabellen 3.9 und 3.10 geht hervor, daß die spezifischen Abbrandraten fester Stoffe in weiten Grenzen variieren, wobei offenbar die verwendeten Meßmethoden, die Form der Proben und die Luftzufuhr sowie Luftmenge von großem Einfluß sind. In der Praxis lassen sich die tatsächlichen Verhältnisse nicht vorhersagen, so daß tendenzmäßig die oberen Werte der Tabellen zu nehmen sind, wenn keine genaueren Angaben vorliegen.

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

Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen sind in den folgenden Tabellen (Tabelle 3.11, Tabelle 3.12 und Tabelle 3.13) angegeben.

Die praktischen Erfahrungen sind diesbezüglich gering, typische Werte in großen Industriehallen liegen bei:

- 0,1 m/min (langsam)
- 0,3 m/min (mittel)
- 1,0 m/min (schnell)
- größer 1,0 m/min (sehr schnell)

Tabelle 3.11: Brandausbreitungsgeschwindigkeit für brennbare Gase bei räumlicher Verbrennung nach L7

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

Tabelle 3.12: Brandausbreitungsgeschwindigkeit von brennbaren Flüssigkeiten nach L7

| brennbare Flüssigkeit | Brandausbreitungsgeschwindigkeit | |
|------------------------------|---|-----------------|
| | 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 |

Aus den Tabellen 3.11 und 3.6 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.

Typische Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für feste Stoffe sind in Tabelle 3.13 angegeben. Aus der Zusammenstellung geht hervor, daß die Anordnung der brennbaren Stoffe für die Ausbreitung mitentscheidend ist.

Tabelle 3.13: Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei festen Stoffen nach L7

| 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 |

3.4.3 Praktische Erfahrungen und Anwendungen

Aus den vorstehenden Daten lassen sich die Brandleistungen für definierte Brandszenarien rechnerisch ableiten. Diese Daten können zusätzlich mit Erfahrungen aus realen Bränden verglichen werden.

Tabelle 3.14: Beobachtete Brandleistungen bei realen Schadenfeuern nach L13

| Brandlast im Gebäude | Raumgröße in m² | Äquiv. Holzbrandlast in kg | Verbrannte Brandlast in kg | gemessene Brandleistung in kW/m² |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| 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 |
| Karton mit Elektroartikel | 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 |
| Holzrippen ^{*)} | 28,5 | 872 | 872 | 300 |
| Pappkarton ^{*)} | 28,5 | 408 | 408 | 480 |

^{*)}: Versuchsbrände nach L13

Aus Tabelle 3.14 geht hervor, daß die beobachteten Brandleistungen von Feststoffen wie Holz, Papier und Pappkartons bei 100-600 kW/m² liegen.

Berechnungen mit den vorherig genannten Abbrandparametern 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 unserem derzeitigen Kenntnisstand sind die Versuchswerte jedoch übertragbar und für Brandschutzanalysen anzuwenden.

Eine Berechnung der Brandleistung in einem Regal von 5 m Höhe und 34 m Länge, welches in einer Regalanlage einer Industriehalle von 2400 m² Grundfläche angeordnet ist, führt auf die in der Bild 1-2 zusammengestellten Werte.

Untersucht wurden Lagergüter mit kleinen und extrem großen Brandleistungen pro m² Brandfläche.

Gelagert sind in dem Regal jeweils 15 t brennbare Stoffe (incl. Verpackung) mit folgenden Abbrandleistungen:

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

Als Bezugsgrößen für den Abbrand wurde die Regaloberfläche von ca. 13 x 34 m² gewählt, wobei die Brandausbreitung mit 5 oder 0,5 m/min (vertikal) und 0,5 m/min (horizontal) festgelegt wurden.

Für das derart festgelegte Brandszenarium wurden die Brandleistungen berechnet, wobei Löschmaßnahmen allerdings nicht berücksichtigt sind.

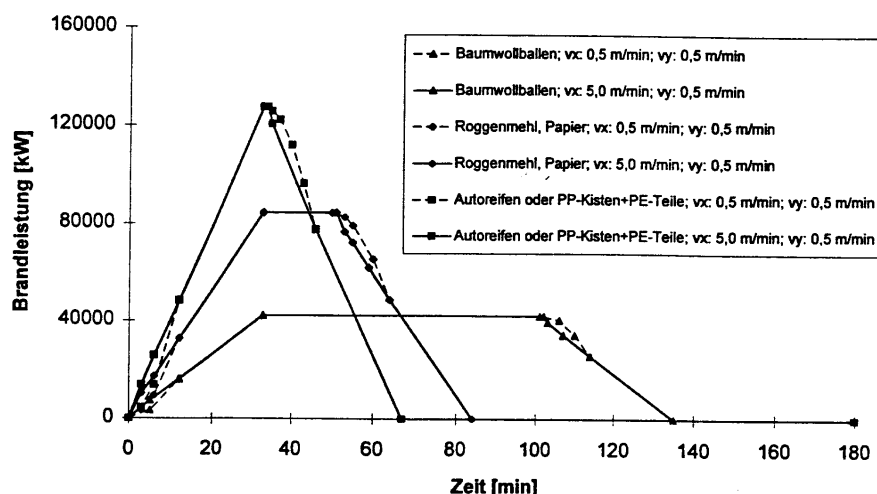


Abbildung 3.6: Brandleistungen bei Regalbränden mit verschiedenen Lagergütern

Aus Abbildung 3.6 geht hervor, daß die Brandleistungen extrem groß werden, wenn der Schaumstoffanteil 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.

Aufgrund der guten Ventilation stand bei den obigen Beispielen in allen Fällen genügend Sauerstoff zu Verfügung, um den Brand optimal zu unterhalten. Die Höhe der Brandausbreitungsgeschwindigkeit in Bereich von 0,5 bis 5,0 m/min 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, sodaß sich in Bezug auf den gesamten Brandverlauf nur geringe Einflüsse ergeben. Nur bei extrem kleinen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten sind diesbezüglich unterschiedliche Auswirkungen zu erwarten.

Mit den so definierten Brandleistungen kann das Brandgeschehen bei einem Regalbrand in der Halle hinsichtlich

- Temperaturentwicklung,
- Branddauer,
- Rauchentwicklung,
- Bauteilbeanspruchung,
- Sprinklerauslösung,
- Rauchmelderauslösung
- äquivalenter Normbranddauer

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

3.4.4 Literaturverzeichnis

- L1 Rempe, A.; Rodewald, G.: Branddlehre. 4. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, Deutscher Gemeindeverlag, 1993.
- L2 Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics. John Wiley and Sons. New York/Toronto/Brisbane, Jan. 1992.
- L3 Opstad, K.: An Engineering Approach to find thermal Properties of Lining Products by use of the Cone Calorimeter Data. Fire and Materials, 3rd Int. Conf., SINTEF NBL, Norwegen Institute of Technology, 1994.
- L4 Kokkala, M. A. et al.: Rate of Heat Release and Ignitability Indices for Surface Linings. Fire and Materials, Vol. 17, 209-216, 1993.
- L5 DIN V18 230 Teil 1: Baulicher Brandschutz im Industriebau. Beiblatt 1, Stand Nov. 1989.
- L6 Böckenförde, D. et al.: Musterbauverordnung für die Länder der BRD. Fassung vom 4. Mai 1990, Werner Verlag, Düsseldorf, 1990.
- L7 N.N.: Brandschutz Formeln und Tabellen. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1979.
- L8 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.
- L9 Dobbernack, R.: Auswertung zur spezifischen Abbrandrate der vorliegenden m-Faktor-Versuche. IBMB, TU Braunschweig, Feb. 1995.
- L10 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.
- L11 Mangs J., Keski-Rahkonen O.: Characterization of the Fire Behavior of a Burning Passenger Car. Part II: Parametrization of Measured Rate of Heat Release Curves, Fire Safety Journal 23, p. 37-49, 1994.

- L12 Max, U.: Zur Berechnung der Ausbreitung von Feuer und Rauch in komplexen Gebäuden. Dissertation, GhK, Kassel, 1990.
- L13 Theobald, C. R.: Growth and development of Fires in Industrial Buildings. CP 40/78, BRE Fire Research Station, Brahamwood, 1978.
- L14 Schneider, U.: Grundlagen zur Festlegung von Brandszenarien für den Brandschutzentwurf. Zeitschrift vfdb, Heft 3, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, S 92-100, 1995