

---

Gesellschaft für  
Reaktorsicherheit (GRS) mbH

---

# Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken

---

GRS-62

## A U T O R E N

Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH:

H. Brenig, H. Holtschmidt,  
H. Liemersdorf (Projektleitung),  
L. Sütterlin

Arbeitsgemeinschaft Brandschutz in Kernkraftwerken:

R. Dobbernack, C. Hahn, D. Hosser, K. Kordina,  
U. Schneider, W. Sprey, H. Wesche

*Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag des Bundesministers des Innern erstellt. Er ist inhaltsgleich mit dem Abschlußbericht (Hauptband) zum Vorhaben SR 144/1 des Bundesministers des Innern.*

### Deskriptoren:

*Brand, Brandausbreitung, Brandbekämpfung, Brandgefährdung, Brandschutz, Brandverhalten, Brandgefahrenanalyse, Kernkraftwerk (KKW), Rechenverfahren, Optimierung*

## VORWORT

Brandschutz ist eine überwiegend empirische Disziplin, und der Wert brandschutztechnischer Vorsorgemaßnahmen kann qualitativ überall dort beurteilt werden, wo der konventionelle Erfahrungsbereich nicht verlassen wird.

Bei Kernkraftwerken sind über die konventionellen Ziele des Brandschutzes hinausgehende Schutzziele von Bedeutung. Weiterhin können übliche Brandschutzmaßnahmen aufgrund anlagenspezifischer Erfordernisse teilweise nicht eingesetzt werden, sondern sind durch andere Lösungen zu ersetzen. Insofern wird bei Kernkraftwerken der Erfahrungsbereich des konventionellen Brandschutzes überschritten. Aus diesem Grund ist der Brandschutz in Kernkraftwerken seit Jahren Gegenstand eingehender Diskussionen in den regelgebenden Gremien.

Zur besseren und objektiven Beurteilung der Brandsicherheit deutscher Kernkraftwerke und zur Unterstützung der Arbeit regelgebender Gremien wurde vom Bundesminister des Innern (BMI) ein entsprechendes Vorhaben in Angriff genommen. Das Vorhaben gliedert sich in drei Phasen:

- Bestandsaufnahme brandschutztechnischer Gegebenheiten, Maßnahmen und Bestimmungen in Kernkraftwerken,
- Erstellung einer Studie mit dem Ziel einer quantitativen Bewertung der Brandgefahr im Kernkraftwerk und einer Optimierung des Brandschutzes,
- Prüfung, welche Konsequenzen aus den gewonnenen Erkenntnissen zu ziehen sind.

Die Bestandsaufnahmen sind abgeschlossen; die Abschlußberichte liegen vor. Damit wurde, insbesondere im Hinblick auf geltende Brandschutzregelungen und -prüfungen sowie deren technische Umsetzung in Kernkraftwerken, eine solide Grundlage zur qualitativen Bewertung des Brandschutzes geschaffen.

Die Ergebnisse der zweiten Phase werden mit der vorliegenden Studie vorgestellt. Der Abschlußbericht umfaßt einen Hauptband (vorliegender Bericht) und drei Fachbände. Im Hauptband sind die durchgeführten Untersuchungen beschrieben und die wesentlichen Ergebnisse dargestellt. In den drei Fachbänden:

- F1 - Theoretische Grundlagenuntersuchungen
- F2 - Experimentelle Grundlagenuntersuchungen
- F3 - Brandgefahren- und Optimierungsanalyse für ein Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor

sind die Arbeiten im Detail dokumentiert.

Die dritte Phase soll im wesentlichen der Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich ihrer Schlußfolgerungen für substantielle Verbesserungen und der Rückwirkungen auf die Regelerstellung dienen.

Die im Rahmen des BMI-Vorhabens durchgeführten Arbeiten sind eng verknüpft mit Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT). Diese BMFT-Vorhaben befassen sich mit der Quantifizierung des brandbedingten Risikobeitrages am Gesamtrisiko beim Betrieb eines Kernkraftwerkes und mit Brandversuchen in einem stillgelegten Kernkraftwerk.

Köln, im September 1985

Gesellschaft für Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## KURZFASSUNG

Es werden theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Beurteilung der Brandgefahren und zur Optimierung der Brandschutzmaßnahmen in deutschen Kernkraftwerken vorgestellt. Als besonders wichtiges Instrumentarium wurde die Brandgefahrenanalyse entwickelt. Hierzu wurde die amerikanische Methode der Brandgefahrenanalyse (Fire Hazard Analysis) weiterentwickelt, damit die konsequente Redundanztrennung in deutschen Kernkraftwerken einbezogen und die Betonung der passiven baulichen Brandschutzmaßnahmen im deutschen Brandschutzkonzept berücksichtigt werden, vor allem aber brandspezifische Ereignisabläufe zeitabhängig darstellbar und quantifizierbar sind.

Die Methode zur Quantifizierung der zeitabhängigen Ereignisabläufe wurde so angelegt, daß sie auch den Einfluß einzelner Brandschutzmaßnahmen zu beurteilen erlaubt. In die Brandereignisablaufanalyse fließen Brandeintrittshäufigkeiten sowie Zuverlässigkeiten aktiver und passiver Brandschutzmaßnahmen ein. Die Brandeintrittshäufigkeiten und die Zuverlässigkeitskenngrößen aktiver Brandschutzmaßnahmen wurden aus deutschen Erfahrungen und der ausländischen Literatur abgeleitet. Die Zuverlässigkeitskenndaten für passive Brandschutzmaßnahmen wurden durch Auswertung von Experimenten gewonnen und durch probabilistische Analysen ergänzt. Die Brandwirkungen sind anhand von Wärmebilanzrechnungen und unter Berücksichtigung der im Rahmen der Gesamtstudie durchgeführten Grundlagenversuche zum Brandverhalten verschiedener Brandgüter ermittelt worden. Die Brandgefahrenanalyse wurde auf ein Kernkraftwerk angewandt und die Brandauswirkungen auf sicherheitstechnisch bedeutsame Systeme und Komponenten analysiert. Insgesamt zehn als relevant identifizierte Brandereignisse wurden untersucht und die sicherheitstechnisch bedeutsamen Brandereignisablaufpfade quantifiziert; ihre jährlichen Eintrittshäufigkeiten liegen im Bereich von  $10^{-3}$  bis  $8 \cdot 10^{-6}$ .

Die Analysen bestätigen die Bedeutung des baulichen Brandschutzes für die Sicherheit der Anlage und zeigen als Schwachstelle des baulichen Brandschutzes z.B. das Offenbleiben von Feuerschutzabschlüssen. Hier hat auch menschliches Fehlverhalten, z.B. fahrlässiges Of-

fenhalten von Brandschutztüren, einen großen Einfluß. Hinsichtlich der Optimierung zeigen die Analysen weiter, daß der Einsatz ortsfester Löschanlagen alleine in vielen Fällen kaum einen Sicherheitsgewinn bringt, da die manuelle Auslösung dieser Anlagen in der Regel zu spät erfolgt. Die frühzeitige Auslösung der stationären Löschanlagen, z.B. automatisch oder durch gleichwertige Handlungsanweisungen an das Betriebspersonal, führt in diesen Fällen zu einer deutlichen Reduzierung der brandbedingten Ausfallhäufigkeiten von Komponenten und Systemen. Automatische Löschanlagen sollten überall dort eingesetzt werden, wo eine ausreichende manuelle Brandbekämpfung nicht möglich ist oder der Einsatz aus sicherheitstechnischen Gründen erforderlich ist. Innerhalb des Kontrollbereiches sind Nutzen und Gewinn von automatisch ausgelösten Löschanlagen den möglichen Folgeschäden bei Fehlauflösungen gegenüberzustellen.

#### ABSTRACT

This study presents theoretical and experimental investigations on the evaluation of fire hazards and the optimization of fire protection measures in German nuclear power plants. Differences between the method presented here and the US "Fire Hazard Analysis" result from the inclusion of the stringent redundancy concept of German nuclear power plants and the emphasis placed on passive structural fire protection measures.

The method includes a time-dependent quantification of fire-specific event sequences. Fire occurrence frequencies and the reliabilities of active fire protection measures were derived from German experiences and literature abroad. The reliability data of passive fire protection measures were obtained by an evaluation of experiments and probabilistic analyses. For the calculation of fire sequences fundamental experiments within the framework of the overall study were taken into consideration. For the quantification of the time-dependent event trees a methodology was applied which permits an evaluation of the influence of the individual fire protection measures. The consequences of fire were investigated for ten fire events iden-

tified as decisive, and the fire sequence paths important in terms of safety were quantified. Their annual frequencies are within a range of  $10^{-3}$  to  $8 \cdot 10^{-6}$ .

The results confirm the importance of structural fire protection for the safety of the plant. The non-closure of fire protection shutters is one of the weak points of structural fire protection. In this context, human failure (negligently keeping fire doors open) plays an important role. According to the results of the time-dependent analyses, the use of stationary fire extinguishing systems alone does not, in many cases improve the safety margins, since the manual actuations of these systems is initiated too late. In these cases, automatically actuated extinguishing systems or clear-cut instructions to the operating personnel could still lead to a considerable reduction in fire-related failure frequencies.

## INHALT

	Seite
1. EINFÜHRUNG	1
1.1 Problemstellung der Studie	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Studie	2
1.3 Organisation der Studie	5
2. UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE	7
3. THEORETISCHE GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN	11
3.1 Einzelzielsetzung	11
3.2 Methode der Brandgefahrenanalyse	12
3.3 Ermittlung der Brandwirkungen	16
3.4 Ermittlung der Brandeintrittshäufigkeiten	19
3.5 Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen	21
3.6 Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit passiver Brandschutzeinrichtungen	26
3.7 Quantifizierung von Brandereignisabläufen	30
3.7.1 Vereinfachte Ereignisablaufanalyse	31
3.7.2 Detaillierte Ereignisablaufanalyse	32
4. EXPERIMENTELLE GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN	37
4.1 Einzelzielsetzung	37
4.2 Kleinmaßstäbliche Versuche mit Öl- und Kabelbränden	38
4.3 Großbrandversuche an Kabelkanälen und Kabelschächten	42
4.4 Brandversuche zur Aerosolablagerung	48
4.5 Erdbebenversuche mit Brandschutzeinrichtungen	53

	Seite
5. BRANDGEFAHRENANALYSE FÜR EIN KERNKRAFTWERK	57
5.1 Einzelzielsetzung	57
5.2 Beschreibung des Kernkraftwerkes	57
5.2.1 Anlagentechnik	59
5.2.2 Brandschutz	62
5.3 Auswahl der zu untersuchenden Raumbereiche	64
5.4 Brandspezifische Ereignisabläufe und ihre Bedeutung für die Sicherheit des Kernkraftwerkes	66
5.5 Brandeintrittshäufigkeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten von Brandschutzmaßnahmen	72
5.6 Ermittlung der Brandwirkung	73
5.7 Analyse von Brandereignisabläufen	79
5.8 Ergebnisse der Brandgefahrenanalyse	83
5.8.1 Ergebnisse der anlagenspezifischen Analysen	83
5.8.2 Aspekte des Personenschutzes	89
6. OPTIMIERUNG DES BRANDSCHUTZES	92
6.1 Optimierungskonzepte	92
6.2 Folgerungen aus den Optimierungsanalysen	93
7. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	98
7.1 Theoretische Grundlagenuntersuchungen	98
7.2 Experimentelle Grundlagenuntersuchungen	100
7.3 Brandgefahrenanalyse für ein Kernkraftwerk	104
7.4 Optimierung des Brandschutzes	106
8. ÜBERTRAGBARKEIT DER ERGEBNISSE	108
8.1 Kriterien für die Übertragbarkeit	108
8.2 Übertragbarkeit der angewandten Methoden und der Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen	110
8.3 Brandschutzkonzepte in älteren und neueren Anlagen	111

	Seite
8.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse der anlagen- spezifischen Analysen	114
8.4.1 Brandgefahrenanalyse	114
8.4.2 Optimierungsansätze	119
SCHRIFTTUM	120

## 1. EINFÜHRUNG

### 1.1 Problemstellung der Studie

Wie die Erfahrung zeigt, lassen sich Brände im Kernkraftwerk nicht von vornherein ausschließen. Sowohl brennbare Materialien, wie Schmieröle oder Kabelisolierungen, als auch potentielle Zündursachen sind vorhanden. Deshalb müssen Brandschutzmaßnahmen getroffen werden, um sicherheitstechnisch wichtige Systeme und Anlagenteile und die sie umschließenden baulichen Anlagen vor Bränden und deren Folgen hinreichend zu schützen. Darüber hinaus dienen diese Brandschutzmaßnahmen auch dem Schutz des Betriebspersonals sowie dem Schutz von Sachgütern und erhöhen die Betriebssicherheit der Anlagen.

Bei näherer Betrachtung der in Kernkraftwerken getroffenen Brandschutzmaßnahmen ist festzustellen, daß in den einzelnen Anlagen unterschiedliche Brandschutzkonzepte zur Anwendung kommen. Diese Unterschiede ergeben sich einmal durch die Weiterentwicklung und Vergrößerung der Kernkraftwerke zu höheren Leistungen hin, was auch zu einer Weiterentwicklung des Brandschutzes führte, und zum anderen dadurch, daß in den einzelnen Ländern unterschiedliche Brandschutzkonzepte verfolgt werden. Im wesentlichen sind dabei zwei Konzepte zu unterscheiden:

- Das eine Brandschutzkonzept stützt sich weitgehend auf den Einsatz besonders zuverlässiger aktiver Brandschutzmaßnahmen zur Brandbekämpfung. Damit soll ein Brand so schnell bekämpft werden, daß er schon in der Entstehungsphase gelöscht wird. Dadurch kann er sich nicht zum Schadensfeuer entwickeln und dementsprechend nicht die Sicherheit der Anlage unzulässig beeinträchtigen. Dieses Konzept wird insbesondere bei Kernkraftwerken in den USA angewandt.
- Das andere Brandschutzkonzept, das größtenteils den neueren Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland zugrunde liegt, zielt darauf ab, vorzugsweise passive Brandschutzmaßnahmen zu verwenden und insbesondere die redundanten Anlagenteile im Kernkraftwerk durch entsprechende Brandschutzmaßnahmen zu trennen. Nach diesem Konzept wird auch ein sich über die Entstehungsphase hinaus entwickelnder Brand auf eine Redundanz begrenzt. Darüber hinaus kommen aktive Brandschutzmaßnahmen bei diesem Konzept dort in Betracht, wo

die brandschutztechnische Trennung redundanter Systeme und Komponenten nicht oder nur unvollständig erreicht werden kann oder wo große Brandlasten vorliegen.

Beiden Konzepten ist gemeinsam, daß sie derzeit weitgehend auf der Grundlage der im konventionellen Bereich (Wohnungsbau, Industrie) gemachten Erfahrungen beurteilt werden. Dieser Erfahrungsbereich wird in der Regel bei Kernkraftwerken dort überschritten, wo sicherheitstechnische Schutzziele von Bedeutung sind und wo übliche Brandschutzmaßnahmen aufgrund anlagenspezifischer Erfordernisse nicht getroffen werden können. Deshalb ist es wichtig, über den konventionellen Erfahrungsbereich hinaus die reale Brandgefahr quantifizieren zu können und damit eine optimale Abstufung der Maßnahmen zu ermöglichen.

Die Suche nach quantitativen Bewertungskriterien wurde unterstützt durch Fragestellungen in den Risikostudien für Kernkraftwerke, in denen brandbedingte Risikobeiträge mit probabilistischen Methoden quantitativ ermittelt werden.

Im Gegensatz zur Aufgabenstellung der Risikostudie geht es in der vorliegenden Studie nicht um eine Absolutbewertung des Brandrisikos, sondern um die Nutzung der probabilistischen Kenngrößen (z. B. Brandeintrittshäufigkeit, Ausfallwahrscheinlichkeit von Brandschutzmaßnahmen und Häufigkeit brandbedingter Auswirkungen) für eine quantitative Bewertung von Brandschutzkonzepten und der einzelnen Brandschutzmaßnahmen sowie zu deren Optimierung.

## 1.2 Zielsetzung und Gliederung der Studie

Die quantitative Beurteilung der in Kernkraftwerken vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten ist das erste wesentliche Ziel der Studie. Ein zweites Ziel ist, belastbare Aussagen zur sicherheitstechnischen Optimierung des Brandschutzes zu erhalten. Zur Erreichung dieser Ziele wurde im Rahmen dieser Studie eine probabilistische Methode - die Brandgefahrenanalyse - entwickelt. Sie baut in ihren Grundzügen auf der amerikanischen Methode der Brandgefahrenanalyse ("Fire Hazard Analysis" /SAN 79/) auf. Aufgrund

der anlagentechnischen Unterschiede zwischen deutschen und amerikanischen Anlagen und den schon erwähnten Unterschieden in den Brandschutzkonzepten der Anlagen in beiden Ländern, mußten allerdings teilweise völlig neue Wege beschritten werden. Ein wesentlich neues Instrumentarium ist hierbei die zeitabhängige Darstellung (Brandverlauf) und Quantifizierung der brandspezifischen Ereignisabläufe. Die Analyse der Brandereignisse führt im Ergebnis zu brandbedingten Auswirkungen sowohl auf sicherheitstechnisch wichtige Systeme als auch auf aktivitätsführende Komponenten und zeigt auf, mit welcher Häufigkeit diese Auswirkungen zu erwarten sind und welche Brandschutzmaßnahmen den wesentlichen Einfluß auf diese Häufigkeit haben.

Die Anwendung der Brandgefahrenanalyse beschränkt sich nicht nur auf die Fragestellungen in dieser Studie. Sie kann mit veränderten Eingangsgrößen (Raumauswahl, Brandszenarien) und anderen Fragestellungen auch anderen Zielsetzungen (z.B. Schutz des Betriebspersonals, Sachschutz) dienen. So ist sie auch Teil der Arbeiten in der deutschen Risikostudie /GRS 84/. Dort werden allerdings die brandbedingten Auswirkungen auf Systeme und Komponenten unter Berücksichtigung ihrer Wahrscheinlichkeit bis hin zu Kernschmelzunfällen und Auswirkungen in die Umgebung weiter verfolgt. Ebenso ist eine Anwendung dieser probabilistischen Methodik zur Unterstützung der deterministischen Vorgehensweise in Genehmigungsverfahren denkbar.

Die Brandgefahrenanalyse wird in der vorliegenden Studie auf ein neues Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor angewandt. Für die Analysen waren Daten bereitzustellen, die in theoretischen und experimentellen Grundlagenuntersuchungen ermittelt wurden.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die in der Studie durchgeführten Untersuchungen und die erzielten Ergebnisse. Er gliedert sich in folgende Kapitel:

- Problemstellung, Zielsetzung und Organisation der Studie
- Untersuchungsschwerpunkte

Ausgehend von einer Beschreibung der Grundzüge der Brandgefahrenanalyse werden die Schwerpunkte der theoretischen und experimen-

tellen Grundlagenuntersuchungen und die der anlagenspezifischen Untersuchungen aufgezeigt.

- Theoretische Grundlagenuntersuchungen

In diesem Kapitel wird vertieft die Methode der Brandgefahrenanalyse behandelt und gezeigt, wie die Daten zur Brandeintrittshäufigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit von Brandschutzmaßnahmen ermittelt wurden. Insbesondere werden die Rechenverfahren zur Ermittlung der Brandwirkungen (Temperatur, Druck, Verqualmung) und zur Quantifizierung der Brandereignisabläufe aufgezeigt.

- Experimentelle Grundlagenuntersuchungen

Das Kapitel beschreibt die durchgeführten Versuche, gibt Auskunft zur Verifikation der Wärmebilanzrechnungen und enthält die Ergebnisse zum Bauteilverhalten, zum Verhalten von Brandaerosolen in Lüftungskanälen und Filtern und Verhalten von Brandschutzeinrichtungen bei Erdbeben.

- Brandgefahrenanalyse für ein Kernkraftwerk

Es wird ein Überblick über Aufbau und Funktionsweise des untersuchten Kernkraftwerkes gegeben und das Brandschutzkonzept beschrieben. Die untersuchten Ereignisabläufe und ihre Bedeutung für die Sicherheit des Kernkraftwerkes werden aufgezeigt. Ergänzend zu den Ergebnissen der anlagenspezifischen Analysen werden Gesichtspunkte des Personenschutzes behandelt.

- Optimierung des Brandschutzes

Nach einer Diskussion möglicher Optimierungskonzepte werden die Folgerungen aus den Optimierungsanalysen aufgezeigt.

- Diskussion und Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen und der Brandgefahrenanalyse sowie die Optimierungsansätze werden diskutiert.

- Übertragbarkeit der Ergebnisse

Das Kapitel enthält eine Beschreibung der Brandschutzkonzepte älterer und neuerer deutscher Kernkraftwerke und behandelt die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Studie auf diese Anlagen.

Als Ergänzung des vorliegenden Berichtes wurden Fachbände erstellt, in denen die durchgeführten Untersuchungen im einzelnen ausführlich dokumentiert sind:

Fachband 1: Theoretische Grundlagenuntersuchungen

Fachband 2: Experimentelle Grundlagenuntersuchungen

Fachband 3: Brandgefahren- und Optimierungsanalyse für ein Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor

### 1.3 Organisation der Studie

Mit den Arbeiten zu dieser Studie wurde im Sommer 1982 begonnen. Die Arbeiten wurden von mehreren Institutionen gemeinsam durchgeführt. Hauptauftragnehmer ist die GRS, die auch die sachliche und fachliche Gesamtkoordination wahrnahm. An den Untersuchungen waren beteiligt:

- Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS):  
Anlagentechnische Untersuchungen, Ereignisablaufanalysen, Ermittlung von Brandeintrittshäufigkeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten aktiver Brandschutzmaßnahmen, ergänzende Untersuchungen zum Aerosolverhalten, Optimierungsüberlegungen.
- Prof. U. Schneider, Fachgebietsleiter für Baustoffkunde und -prüfung, Universität Kassel:  
Ermittlung der Brandwirkungen anhand thermodynamischer Rechnungen, Beurteilung der Randbedingungen (brandschutztechnische Gegebenheiten) der Brandgefahrenanalyse, spezielle Untersuchungen zur Aerosolbildung und Verqualmung in geschlossenen Räumen.
- Ingenieurbüro König und Heunisch, Frankfurt/Main:  
Ereignisablaufanalysen, Quantifizierung der brandbedingten Abhängigkeiten (Zeitabhängigkeit, Brandwirkungen), Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit passiver Brandschutzmaßnahmen, Vorbereitung und Auswertung der Erdbebenversuche, Optimierungsüberlegungen.
- Prof. K. Kordina, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Universität Braunschweig:

Durchführung der Brandversuche (Brandwirkungen, Bauteilverhalten, Aerosolverhalten), ergänzende Wärmebilanzrechnungen, Beurteilung der Randbedingungen (brandschutztechnische Gegebenheiten) der Brandgefahrenanalyse.

Für die Bearbeitung verschiedener Teilaufgaben und zur Beratung wurde eine Reihe weiterer Institutionen, bzw. Sachverständige, hinzugezogen:

- Herr Branddirektor Günther, Feuerwehr Hamburg:  
Beratung zum Aspekt Brandeintrittshäufigkeiten, Beurteilung von Brandszenarien und der manuellen Brandbekämpfungsmöglichkeiten
- Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik II des Kernforschungszentrums Karlsruhe:  
Bereitstellung der Filter für die Versuche zum Aerosolverhalten, Beratung zur Durchführung dieser Versuche, Auswertung und Beurteilung der Wirkungen auf Filter
- Striewisch GmbH, Essen:  
Studie über automatische Branddetektionsalarmbe- und verarbeitungseinrichtungen (Einsatzkonditionen, Signalübertragung und Verarbeitung, Zuverlässigkeit), Untersuchungen zur Eignung, Anwendung und Zuverlässigkeit von CO<sub>2</sub>- und Sprühwasserlöschanlagen
- TÜV-Bayern, München:  
Beratung hinsichtlich relevanter Fragestellungen aus der Begutachtungspraxis bei Kernkraftwerken, Bereitstellung von Informationen zur Anlagentechnik und zu den brandschutztechnischen Gegebenheiten
- Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Massivbau:  
Durchführung der Rütteltischversuche zur Erdbebenbeanspruchung von Brandschutzeinrichtungen

## 2. UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE

Um die sicherheitstechnische Bedeutung von Bränden im Kernkraftwerk detailliert beurteilen und die Brandschutzmaßnahmen unter Optimierungsgesichtspunkten bewerten zu können, war die Erarbeitung und Erprobung einer speziellen Methodik (Brandgefahrenanalyse) erforderlich. In ihren Grundzügen beinhaltet diese Analyse:

- die Ermittlung kritischer Raumbereiche (u.a. nach Brandlast, sicherheitstechnischer Bedeutung),
- quantitative Ereignisablaufanalysen für unterschiedliche Brandverläufe (Temperatur-Zeitverläufe, Rauchentwicklung in Abhängigkeit von Brandlast, Raumgeometrie, Ventilation, Brandschutzmaßnahmen) und
- die Untersuchung des relativen Einflusses unterschiedlicher brandbeeinflussender Faktoren (Brandschutzmaßnahmen und anlagentechnische Gegebenheiten) auf die brandbedingten Ausfälle von Komponenten und Systeme bzw. auf thermische Einwirkungen auf aktivitätsführende Komponenten.

Für die Durchführung einer solchen Analyse werden Daten benötigt, z.B. zur Eintrittshäufigkeit von Bränden, zur Ausfallwahrscheinlichkeit von aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen und Methoden zur Ermittlung der Brandwirkungen (Temperatur, ggf. Druck, Rauchentwicklung). Bevor die anlagenspezifischen Analysen für ein Referenz-Kernkraftwerk durchgeführt werden konnten, waren deshalb umfangreiche Vorarbeiten erforderlich. Sie sind weitgehend anlagenunabhängige Grundlagenuntersuchungen, deren Aufgabenstellungen durch konkrete Problemstellungen der anlagenspezifischen Analysen begrenzt wurden.

Die theoretischen Grundlagenuntersuchungen stellen den ersten Untersuchungsschwerpunkt dar (Kapitel 3). Die Untersuchungen stecken in ihren einzelnen Aufgabenstellungen jeweils den derzeitigen Kenntnis- und Erfahrungsbereich ab und machen ihn anhand gezielter Erweiterungen und Ergänzungen für die gestellte Aufgabe nutzbar. Dabei wurden folgende Themenkreise bearbeitet:

- Vorgehensweise bei der Brandgefahrenanalyse,
- Methoden zur Ermittlung von Brandwirkungen,

- statistische Auswertungen von Brandeintrittshäufigkeiten,
- statistische Auswertungen der Ausfallwahrscheinlichkeiten von aktiven Brandschutzmaßnahmen,
- statistisch-probabilistische Untersuchungen zur Ausfallwahrscheinlichkeit passiver Brandschutzeinrichtungen,
- Methoden zur Quantifizierung brandspezifischer Ereignisabläufe.

Zur Ergänzung der theoretischen Studien waren experimentelle Grundlagenuntersuchungen notwendig; sie stellen den zweiten Untersuchungsschwerpunkt dar (Kapitel 4). Diese Untersuchungen dienen einmal der gezielten experimentellen Absicherung thermodynamischer Rechnungen und ihrer Eingangsdaten, zum anderen liefern sie Erkenntnisse über das Verhalten von Anlagenteilen, insbesondere Brandschutzeinrichtungen im Brandfall oder bei dynamischen Beanspruchungen. Die Versuche wurden so konzipiert, daß sie insbesondere der Verifizierung der Verwendungsfähigkeit von passiven Brandschutzeinrichtungen unter kernkraftwerksspezifischen Randbedingungen dienen konnten.

Im einzelnen wurden mit den experimentellen Grundlagenuntersuchungen vier Zielsetzungen verfolgt:

- grundlegende Aussagen über das Brandverhalten von Öl- und Kabelbrandlasten unter variierten Randbedingungen zu erhalten,
- im Rahmen von Großversuchen realer Größe (large scale) die Auswirkungen von Bränden mit realen Brandlasten auf Umschließungsbauteile einschließlich ihrer Einbauten, wie Türen, Feuerschutzklappen, Kabelschotts oder Rohrdurchführungen, zu bewerten und zusätzlich einen Vergleich mit nach Norm klassifizierten Bauteilen vorzunehmen,
- die Ablagerung von Brandaerosolen in Lüftungsleitungen und an Filtern zu erfassen und
- die Standsicherheit von Brandschutzeinrichtungen unter dynamischer Belastung (Erdbeben) zu untersuchen.

Auf der Basis der theoretischen und experimentellen Grundlagenuntersuchungen konnte dann die Brandgefahrenanalyse für ein Kernkraftwerk

durchgeführt werden. Sie stellt den dritten Untersuchungsschwerpunkt (Kapitel 5) dar. Einleitend werden zunächst die einzelnen Gebäude des Kernkraftwerkes mit ihren wichtigsten Systemen und Komponenten beschrieben. Dabei wird zum besseren Verständnis der nachfolgenden Untersuchungsschritte auch auf die wesentliche Funktion dieser Einrichtungen eingegangen. Die Analyse konzentriert sich auf solche Raumbereiche, die im Hinblick auf die Auswirkungen eines Brandes als kritisch erscheinen. Die Auswahl dieser Raumbereiche wird nach einem Satz brandschutztechnischer und sicherheitstechnischer Kriterien getroffen.

Zur quantitativen Bewertung der Brandgefahr werden dann die Häufigkeiten von Bränden sowie die Ausfallwahrscheinlichkeiten der aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen für die ausgewählten Raumbereiche ermittelt; hierbei wird auf die in den grundlegenden theoretischen Arbeiten bereitgestellten Daten zurückgegriffen. Mit der erarbeiteten Methode zur quantitativen Beurteilung der Brandgefahren werden dann die unter Berücksichtigung der sicherheits- und brandschutztechnischen Randbedingungen denkbaren Brandereignisabläufe untersucht. Sie werden in Form von brandspezifischen Ereignisablaufdiagrammen dargestellt und analysiert. Im wesentlichen werden solche Fälle betrachtet, bei denen es brandbedingt zum Ausfall sicherheitstechnisch wichtiger Anlagenteile oder zu thermischen Einwirkungen auf aktivitätsführende Komponenten kommen kann.

Die Ergebnisse der Brandgefahrenanalyse werden unter folgenden Gesichtspunkten ausgewertet:

- Gibt es Schwachstellen im Brandschutzkonzept und welche Bedeutung haben sie für die Sicherheit des Kernkraftwerkes?
- Wo können sich Änderungen im Brandschutzkonzept oder effektivere Gestaltung von Brandschutzmaßnahmen am günstigsten auf Reaktorsicherheit und Personenschutz auswirken?
- Wie könnte künftig ein aus sicherheitstechnischer und betrieblicher Sicht optimiertes Brandschutzkonzept entwickelt werden?

Die Festlegung der analysewürdigen Raumbereiche und die Eingrenzung der relevanten brandspezifischen Ereignisablaufpfade erfolgen primär

- der Aufgabenstellung der Studie entsprechend - nach sicherheitstechnischen Gesichtspunkten. Soweit sich aus den Untersuchungen auch Erkenntnisse zum Personenschutz oder Sachschutz ableiten lassen, werden diese entweder in Abschnitt 5.8.2 aufgezeigt oder in den Schlußfolgerungen mitbehandelt.

---

### 3. THEORETISCHE GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN

#### 3.1 Einzelzielsetzung

Zunächst wird ein Konzept zur Brandgefahrenanalyse entwickelt. Es umfaßt die Identifizierung besonders gefährdeter Bereiche, Modelle zur Beschreibung von Brandereignisabläufen unter Berücksichtigung der besonderen brandschutztechnischen und sicherheitstechnischen Randbedingungen und Verfahren zur Quantifizierung dieser Brandereignisabläufe.

Zur quantitativen Bewertung der Brandauswirkungen auf sicherheitstechnisch wichtige Einrichtungen und Personal ist das Brandgeschehen rechnerisch zu beschreiben. Hierzu stehen thermodynamische Verfahren zur Verfügung, die sich jedoch nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse in Kernkraftwerken anwenden lassen. Aus diesem Grunde waren anhand einer Literaturrecherche die vorliegenden Rechenmodelle auf ihre Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen hin zu überprüfen. Es waren für die Anwendung dieser Studie solche Modelle auszuwählen, die durch begrenzte Modifikationen eine realistische oder zumindest konservative Ermittlung der wesentlichen Brandwirkungen - insbesondere Temperatur, Rauch und Druck - gestatten. In Verbindung mit den experimentellen Arbeiten (Kapitel 4) war eine Verifikation dieser Rechenmodelle anzustreben.

Als weitere Voraussetzung zur quantitativen Bewertung von Brandgefahren waren die Brandeintrittshäufigkeiten in Kernkraftwerken zu bestimmen. Die Auswertung der in- und ausländischen Literatur hat ergeben, daß Informationen und Daten über Brandeintrittshäufigkeiten in Kernkraftwerken im wesentlichen nur in amerikanischer Literatur enthalten sind. Die Übertragbarkeit dieser Daten auf deutsche Kernkraftwerke mußte durch Formulierung realer Randbedingungen und stichprobenhafte Überprüfung anhand deutscher Vergleichszahlen sichergestellt werden.

In ähnlicher Weise war bei den Ausfallwahrscheinlichkeiten aktiver Brandschutzmaßnahmen in Kernkraftwerken vorzugehen. Auch hier war das reichhaltige ausländische Datenmaterial zu sichten. Zusätzlich wurden vorliegende deutsche Daten aus dem konventionellen Industrie-

bereich statistisch ausgewertet und mit den überwiegend amerikanischen Daten aus dem Kernkraftwerksbereich verglichen.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit passiver Brandschutzeinrichtungen bei natürlichen Bränden war einmal aus den Erfahrungen und statistischen Daten von deutschen Normbrandversuchen an kritischen Bauteilen abzuleiten. Die Übertragbarkeit von Normbrandergebnissen auf natürliche Brände war zusätzlich abzusichern durch probabilistische Untersuchungen von Bauteilen, deren Brandverhalten rechnerisch beschrieben werden kann.

Besonderes Augenmerk bei der Quantifizierung der Brandereignisse war auf den Zeitverlauf des Brandes und seiner Wirkungen sowie auf die Wirkungsweise und gegenseitige Abhängigkeit der aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen zu richten. Hierzu mußte von klassischen Methoden der Ereignisablaufanalyse in Modellierung und Rechenverfahren abgewichen werden.

### 3.2 Methode der Brandgefahrenanalyse

Die in der vorliegenden Studie entwickelte Methode baut in ihren Grundzügen auf die amerikanische Methode der Brandgefahrenanalyse ("Fire Hazard Analysis") auf. Jedoch bestehen bei der Anlagentechnik und bei den Brandschutzkonzepten zwischen deutschen und amerikanischen Anlagen große Unterschiede.

Während sich das Brandschutzkonzept der Kernkraftwerke in den USA weitgehend auf den schnellen Einsatz aktiver Maßnahmen zur Brandbekämpfung stützt, nutzen die Brandschutzkonzepte in deutschen Kernkraftwerken den redundanten Aufbau der Sicherheitseinrichtungen und trennen diese räumlich durch geeignete passive bauliche Brandschutzmaßnahmen. Diese Unterschiede bedingen auch ein anderes Vorgehen bei der Brandgefahrenanalyse und führen dazu, daß brandspezifische Ereignisabläufe zeitabhängig dargestellt und quantifiziert werden.

Wesentlicher Bestandteil der Brandgefahrenanalyse ist die probabilistische Ereignisablaufanalyse. In ihr erfolgt die Quantifizierung der Brandereignisse mit Hilfe von zeitabhängigen brandspezifischen Ereignis-

nisablaufdiagrammen und Fehlerbaumanalysen. Resultate der Brandgefahrenanalyse sind die Eintrittshäufigkeiten für brandbedingte Ausfälle von sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten und Systemen bzw. die Eintrittshäufigkeit für brandbedingte Aktivitätsfreisetzungen. Die einzelnen Schritte der Brandgefahrenanalyse sind in Bild 3.2/1 zu sehen.

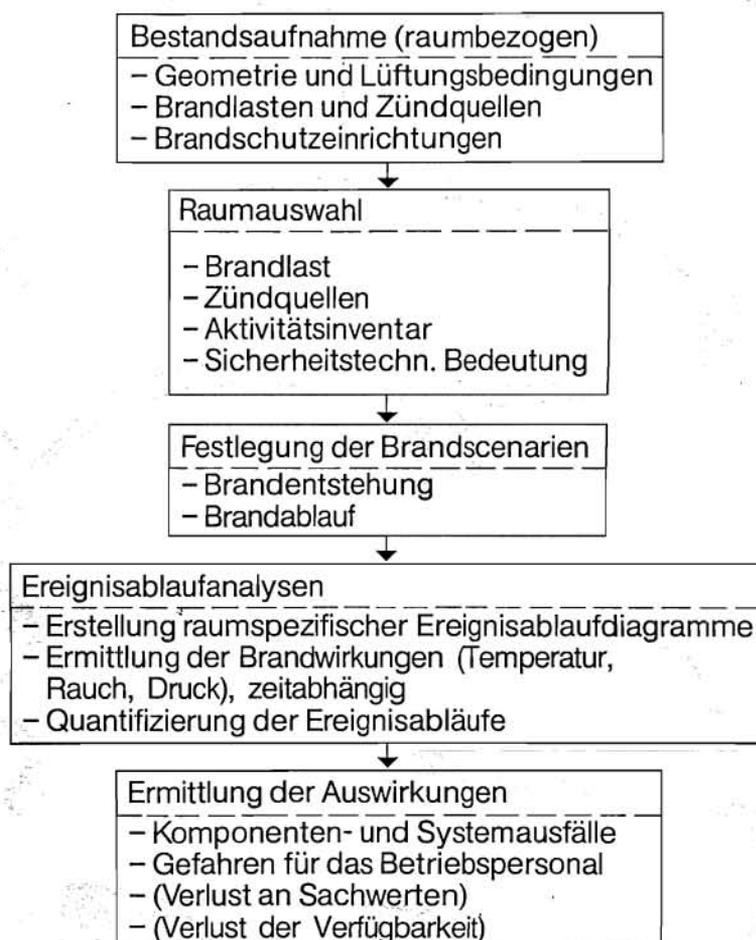


Bild 3.2/1:  
Schritte der Brandgefahrenanalyse

Bild 3.2/2 zeigt schematisch für ein spezielles Beispiel die Entwicklung des Ereignisablaufdiagramms aus dem Brandverlauf. Zum Zeitpunkt  $t_0$  entsteht mit der Häufigkeit  $i$  ein Brand im betrachteten Raum. Die in dem Raum befindliche Brandmeldeanlage meldet zum Zeitpunkt  $t_1$  mit der bedingten Wahrscheinlichkeit  $D$  den Brand. Der Brandverlauf wird wesentlich von den Ventilationsbedingungen beeinflusst. In Abhängigkeit vom Erfolg des Lüftungsabschlusses zum Zeitpunkt  $t_2$  ergeben sich

die beiden möglichen Brandverläufe I und II. Befindet sich innerhalb des Brandraumes eine Komponente, die bei einer Raumtemperatur  $\geq T_k$  versagt, so wird diese beim Brandverlauf I (kein Lüftungsabschluß) zum Zeitpunkt  $t_{k1}$ , beim Brandverlauf II (erfolgreicher Lüftungsabschluß) aber erst zum Zeitpunkt  $t_{k2}$  ausfallen. Die brandbedingte Ausfallhäufigkeit der Komponente kann weiterhin durch aktive Brandschutzmaßnahmen reduziert werden. In unserem Beispiel beginnt das Betriebspersonal nach einer Verzugszeit  $\Delta t_1$  zum Zeitpunkt  $t_3$  mit der Brandbekämpfung. Die Brandbekämpfung zum Zeitpunkt  $t_3$  führt für den Brandverlauf I, unabhängig vom Löscherfolg, zu keiner Reduzierung der Ausfallrate der Komponente K, da diese zum Zeitpunkt  $t_3$  bereits ausgefallen ist. Beim Brandverlauf II dagegen führt die Brandbekämpfung zum Zeitpunkt  $t_3$  in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit des Löscherfolgs zu einer Reduzierung der Ausfallrate.

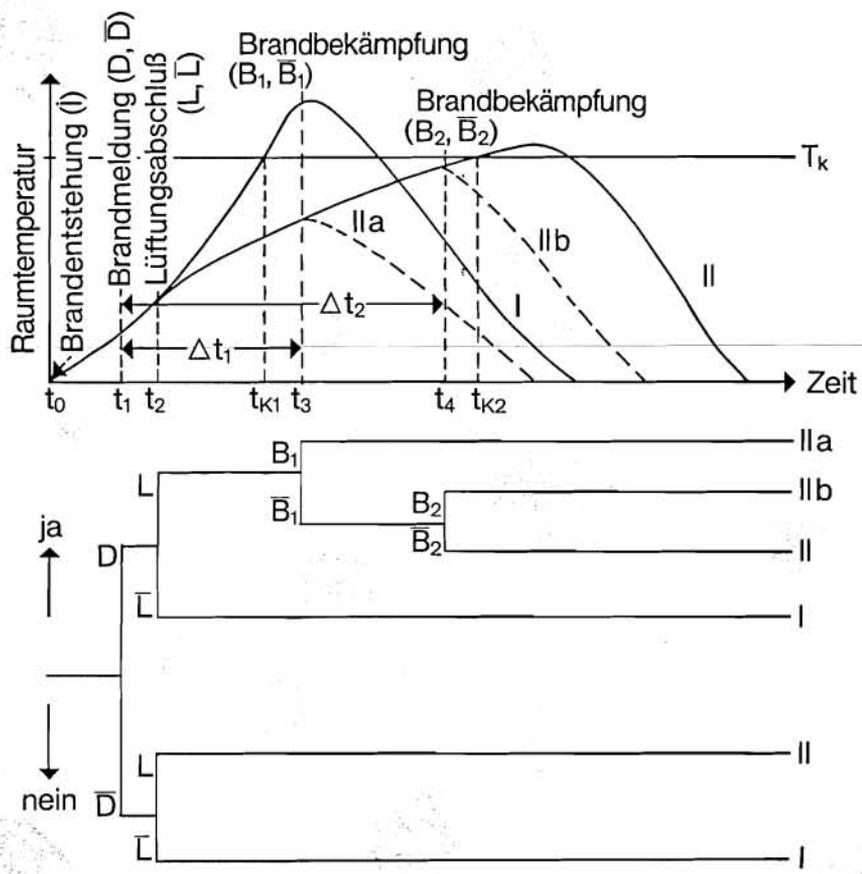


Bild 3.2/2:

Brandverlauf (Raumtemperatur) und brandspezifischer Ereignisablauf (schematisch)

Bei diesem Brandverlauf erfolgt außerdem nach einer Verzugszeit  $\Delta t_2$  noch eine Brandbekämpfung zum Zeitpunkt  $t_4$  durch z.B. Werks- bzw. Betriebsfeuerwehr.

Die Wahrscheinlichkeiten  $B$  ( $\bar{B} = 1 - B$ ) für den Löscherfolg sind unter anderem abhängig von den Verzugszeiten  $\Delta t$ . Diese Zeitabhängigkeit muß bei der Berechnung der Ereignisabläufe beachtet werden. Darüber hinaus ergeben sich durch Berücksichtigung von Streubreiten nicht nur zwei Werte für die Ausfallhäufigkeit der Komponente, wie in Bild 3.2/2 schematisch dargestellt, sondern eine zeitliche Verteilung.

An diesem Beispiel läßt sich auch zeigen, wie Verbesserungen im Brandschutz optimal für das Brandraummodell in Bild 3.2/2 vorgenommen werden können:

- durch Reduzierung der Ausfallrate für den Lüftungsabschluß (Übergang auf Kurve II) und
- durch Verkürzung der Verzugszeit  $\Delta t_1$  (zum Beispiel durch automatisch ausgelöste Löschanlagen).

Zur Quantifizierung der Ereignisablaufdiagramme wurde ein Verfahren herangezogen, das die Eintrittshäufigkeit brandbedingter Auswirkungen in der Anlage als Funktion der Branddauer berechnet und gleichzeitig auch die für die Optimierung der Brandschutzmaßnahmen wichtigen Informationen liefert:

- Einfluß der einzelnen Parameter auf den Brandverlauf,
- Gewicht einer Brandschutzmaßnahme für die Häufigkeit eines Ereignisablaufes.

Parallel hierzu wurden in der Studie auch die Eintrittshäufigkeiten für brandbedingte Auswirkungen unter Vorgabe fester Ausfallwahrscheinlichkeiten der Einzelmaßnahmen ermittelt. Die jeweiligen Ergebnisse werden verglichen mit dem Ziel, die Anwendbarkeit eines abgekürzten Rechenverfahrens zu prüfen.

### 3.3 Ermittlung der Brandwirkungen

Im Fachband 1, Teil A werden die in der Literatur verwendeten Rechenmodelle zur Ermittlung der Brandwirkungen ausführlich beschrieben und hinsichtlich der Anwendung im Rahmen dieser Studie bewertet.

Die Brandwirkungen in den in Frage stehenden Raumbereichen wurden auf der Grundlage theoretischer Analysen und Berechnungen ermittelt. Dazu wurden die im Rahmen der Bestandsaufnahme /ABK 81/ festgestellten Daten über Brandraumgeometrien, Brandlasten und Ventilationsverhältnisse verwendet. Die Untersuchungen wurden auf die gemäß Abschnitt 5.3 ermittelten Räume und die unmittelbar angrenzenden Bereiche beschränkt, wobei davon auszugehen ist, daß damit die als kritisch anzusehenden Räume und Bereiche der Referenzanlage erfaßt sind.

Die in der Literatur aufgeführten Rechenmodelle zur Beschreibung der Brandwirkungen (Temperatur, Rauch und Druck) sind im Fachband 1, Teil A ausführlich beschrieben. Für die Studie wurde auf die Programme "HAL" und "DOB" zurückgegriffen, die für natürlich belüftete Einraummodelle anhand der Wärmebilanzrechnung die Brandwirkungen errechnen. Um den Einfluß spezieller Gegebenheiten in Kernkraftwerken, beispielsweise den Einfluß der Zwangsventilation und die Wirkung von stationären Löschanlagen, zu berücksichtigen sowie die Brandwirkungen im Bereich der Hauptkühlmittelpumpen zu ermitteln, war eine Erweiterung der Programme notwendig. Neben dieser Erweiterung sind auch den speziellen Verhältnissen der Kernkraftwerke angepaßte Eingangsparameter bezüglich des Abbrandverhaltens von Kabel- und Ölbrandlasten erforderlich. Diese wurden anhand der Versuchsergebnisse festgelegt (siehe Fachband 2).

Dort, wo die Abbrandgeschwindigkeiten nicht unmittelbar aus den Versuchsergebnissen abgeleitet werden können, müssen sie variiert werden. Dabei werden die oberen Grenzen anhand der Luftwechselraten im Kernkraftwerk und Meßergebnisse der Brandversuche festgelegt. Für die Berechnung der Brandwirkungen in Kabelkanälen wird die Brandausbreitung durch Annahme bestimmter Ausbreitungsgeschwindigkeiten simuliert, das heißt, die Energiefreisetzung wird nicht durch Abbrandraten, sondern in diesem Fall direkt über die Ausbreitung ermittelt. Nach den vorlie-

genden Erfahrungen sind die erzielten Rechenergebnisse als hinreichend konservativ, aber weitgehend realistisch einzustufen.

Mit den verwendeten Programmen wurden die in Kapitel 4 beschriebenen Großbrandversuche nachgerechnet. In Bild 3.3/1 ist beispielhaft die rechnerische Simulation des Temperatur-Zeit-Verlaufs für einen Brand in einem horizontalen Kabelkanal (siehe Abschnitt 4.3) den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Die Rechenergebnisse zeigen eine vergleichsweise gute Übereinstimmung mit den Messungen. Die im Mittel höheren Temperaturen in der Berechnung erklären sich teilweise daraus, daß für die Wandmaterialien Gasbeton (GS) zugrunde gelegt wurde. Im Versuch sind dagegen tatsächlich nur ca. 25 % Gasbeton und 75 % Schamottemauerwerk mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit zur Anwendung gekommen. Dadurch ergeben sich im Versuch zwangsläufig niedrigere Temperaturen. In Bild 3.3/1 ist zusätzlich die Einheits-temperaturkurve (ETK) nach DIN 4102 eingetragen, die der Auslegung von Bauteilen zugrunde gelegt wird.

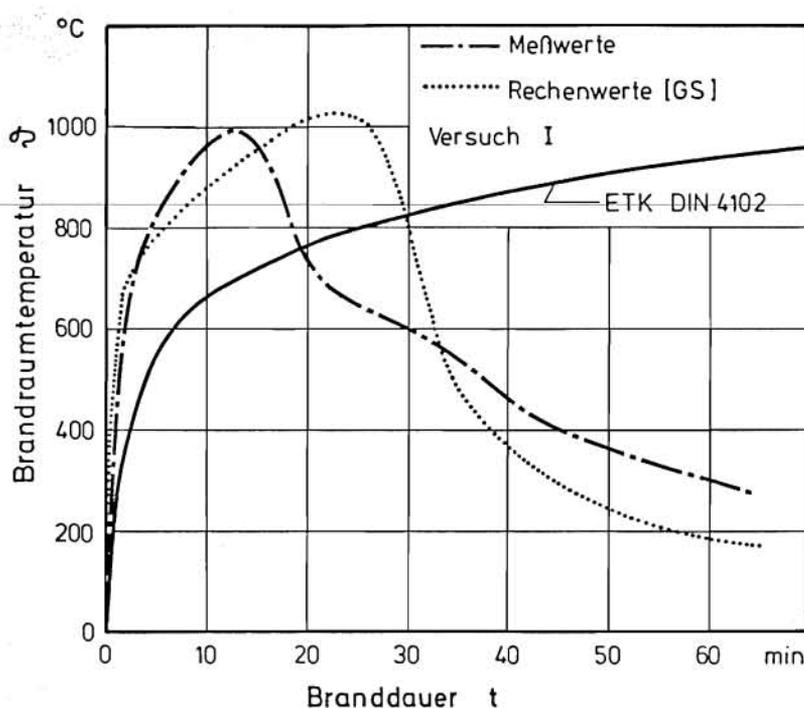


Bild 3.3/1:

Berechnete und gemessene Temperaturen im horizontalen Kabelkanal (vgl. Abschnitt 4.3)

In den Berechnungen hat sich weiterhin gezeigt, daß die ungünstigsten Brandabläufe immer dann auftreten, wenn neben der Zwangsventilation eine zusätzliche Ventilation infolge offenstehender Türen entsteht. Bei geschlossenen Türen und Brandschutzklappen errechnen sich dagegen nur Schwelbrände mit vergleichsweise langen Branddauern bei im Mittel niedrigen Brandraumtemperaturen. Eine rasche Abschottung der Zuluft scheint im realen Brandverlauf jedoch nicht immer gewährleistet zu sein; die berechneten Temperaturanstiege im Bereich der Zuluftklappen sind in der Regel so niedrig, daß die Schmelzloten nicht ansprechen.

Zur Modellierung der Brandwirkungen im Bereich der Hauptkühlmittelpumpen im Sicherheitsbehälter des Reaktorgebäudes wurde das Programm DOB dahingehend erweitert, daß die Mehrraumproblematik in vereinfachter Form behandelt werden kann. Die Simulation eines Leckagebrandes ergibt, daß der Bereich der Hauptkühlmittelpumpen bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen und Drücken in wenigen Minuten verqualmt. Die Druckerhöhung führt zu einem raschen Öffnen der Dampferzeugerüberströmdecken, so daß sich auch der obere Teil des Sicherheitsbehälters schnell mit Rauchgasen füllt. Die schnelle Verqualmung ist in erster Linie nur für den Personenschutz von Bedeutung.

Die Rechenergebnisse zeigen deutlich niedrigere Temperaturen und Druckwerte, als nach den bisherigen Überlegungen anzunehmen war. Darüber hinaus sei angemerkt, daß die Ergebnisse (siehe Abschnitt 5.6) noch verbesserungsfähig sind, wenn bei der Modellerstellung mit größerem Aufwand gearbeitet wird.

Die rechnerische Simulation von schnell wirkenden Wasserlöschanlagen hat ergeben, daß damit die Brandbekämpfung zu optimalen Ergebnissen führt. Durchweg wurden Abkühlgeschwindigkeiten von  $> 80$  K/min ermittelt, so daß auch größere Brände mit vergleichsweise hohen Abbrandraten innerhalb weniger Minuten gelöscht werden können. Es muß erwähnt werden, daß die theoretische Modellierung von Löschanlagen kaum untersucht ist und somit durchweg neuartige Verfahren zur Anwendung gekommen sind.

### 3.4 Ermittlung der Brandeintrittshäufigkeiten

Die folgenden Ausführungen stützen sich auf die Untersuchungen in /GRS 84/. Dort wurden für die Ermittlung der Brandeintrittshäufigkeiten in Kernkraftwerken die in- und ausländische Literatur, die Betriebserfahrungen aus Kernkraftwerken und konventionellen Kraftwerken sowie die Daten der Sachversicherer und der Feuerwehr ausgewertet. Angaben über Brandereignisse in Kernkraftwerken liegen als mittlere Brandeintrittshäufigkeiten pro Anlage und Jahr und als brandgut-, raum- und gebäudespezifische Brandeintrittshäufigkeiten vor. Die diesen Auswertungen zugrundeliegende Datenbasis berücksichtigt nur solche Brände, die für die Sicherheit der Anlage relevant waren.

Die mittlere Brandeintrittshäufigkeit für amerikanische Kernkraftwerke beträgt 0,17 Brände pro Jahr und Anlage. Daten für die Bundesrepublik liegen in umfangreicher Form nur für konventionelle Kraftwerke vor. Die mittlere Brandeintrittshäufigkeit für diese Anlagen beträgt danach 0,14 Brände pro Jahr und Anlage. Spezielle Daten für deutsche Kernkraftwerke sind aufgrund der gegenüber den USA geringeren Anzahl der Anlagenbetriebsjahre mit Vorsicht zu betrachten. Erste Auswertungen vorliegender Daten lassen jedoch den Schluß zu, daß sich die mittleren Brandeintrittshäufigkeiten für amerikanische und deutsche Kernkraftwerke nicht wesentlich unterscheiden.

Für die Ermittlung von brandgutbezogenen Brandeintrittshäufigkeiten werden in /GAL 80/ sieben Stoffklassen berücksichtigt. Die Anteile der einzelnen Brandgüter, bezogen auf die Gesamtzahl aller Brandereignisse in amerikanischen DWR- und SWR-Anlagen, sind in Tabelle 3.4/1 aufgeführt.

Die Verteilung der Stoffklassen auf die Anlage ist in deutschen und amerikanischen Kernkraftwerken nicht wesentlich unterschiedlich. Raum- bzw. gebäudespezifische Brandeintrittshäufigkeiten sind ebenfalls nur in der amerikanischen Literatur aufgeführt. Die mittleren jährlichen Brandeintrittshäufigkeiten für sechs typische Raumbereiche in Kernkraftwerken sind in Tabelle 3.4/2 dargestellt.

Tab. 3.4/1:

Anteile verschiedener Stoffklassen an Bränden  
in amerikanischen Leichtwasserreaktoren

Brandgut	Prozentualer Anteil
Kunststoff	13,8
Holz	10,3
Öl	39,7
brennbare Flüssigkeiten	3,45
brennbare Gase	3,45
Kabelisolierungen	10,3
elektrische Einrichtungen	19,0

Tab. 3.4/2:

Mittlere jährliche Brandeintrittshäufigkeit für typische  
Raumbereiche bzw. Gebäude in Kernkraftwerken

Raumbereich bzw. Gebäude	Brandeintrittshäufigkeit [1/a]
Warte	3,0 E-3
Kabel-Verteilungsraum	1,2 E-2
Notstromdieselraum	2,9 E-2
Containment	1,1 E-2
Maschinenhaus	2,1 E-2
Hilfsanlagegebäude	3,4 E-2

Die hier angeführten Daten beruhen also im wesentlichen auf amerikanischen Betriebserfahrungen und müssen deshalb auf die deutschen Gegebenheiten übertragen werden.

Ausgehend von annähernd gleichen mittleren Brandeintrittshäufigkeiten pro Anlage und Jahr in deutschen und amerikanischen Kernkraftwerken

kann angenommen werden, daß eine Verwendung der amerikanischen raum-spezifischen Daten auf deutsche Kernkraftwerke dann möglich ist, wenn sich die Gebäude bzw. Räume nach

- Art und Menge der Brandgüter,
- möglichen Brandszenarien und
- Funktion und Aufbau

nicht wesentlich unterscheiden. Bei Unterschieden in Art und Menge der Brandgüter zwischen amerikanischen und deutschen Raumbereichen können die amerikanischen Daten mit Hilfe der brandgutbezogenen Häufigkeitsanteile (siehe Tab. 3.4/1) angepaßt werden. Bei der Anwendung von Zahlen sind jeweils im Einzelfall die raumspezifischen Randbedingungen - Geometrie, Lüftung, Funktion des Raumes - als auch die brandspezifischen Randbedingungen - Art und Höhe der Brandlast, Zündmöglichkeiten, passive und aktive Brandschutzmaßnahmen - zu untersuchen. Nicht erfaßte Raumbereiche sind den angegebenen Bereichen nach Brandlast und Zündquellen sinnvoll zuzuordnen.

### 3.5 Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen

Die Ausführungen zu den Ausfallwahrscheinlichkeiten aktiver Brandschutzmaßnahmen stützen sich ebenfalls auf die Untersuchungen in /GRS 84/. Dort wurde für die Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen die in- und ausländische Literatur ausgewertet. Daten der deutschen Sachversicherer (VDS) sowie Angaben der Hersteller von automatischen Brandmeldeanlagen und stationären Löschanlagen wurden im Rahmen der vorliegenden Studie ausgewertet. Spezielle Angaben über die Zuverlässigkeit bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen unmittelbar aus Betriebserfahrungen in deutschen Kernkraftwerken liegen derzeit nicht vor.

Zur Quantifizierung brandspezifischer Ereignisabläufe werden die Ausfallwahrscheinlichkeiten folgender Funktionen benötigt:

- Brandmeldung,
- Funktion "Brandschutztüren im Anforderungsfall geschlossen",

- Funktion "Brandschutzklappen im Anforderungsfall geschlossen",
- Brandbekämpfung,
- manuelle Auslösung bzw. Inbetriebnahme von Brandschutzmaßnahmen (Hierbei werden Türen und Klappen nur hinsichtlich ihrer Schließfunktion berücksichtigt.)

#### ● Brandmeldung

Es werden personelle Brandmeldung, automatische Brandmeldung und Hinweise auf Brände durch anlagentechnische Ausfälle unterschieden.

Die Meldung des Brandes direkt aus dem betroffenen Raumbereich bzw. vom überwachten Objekt durch automatische Brandmeldeanlagen oder anwesende Personen in der Brandentstehungs- bzw. Brandausbreitungsphase wird als direkte Brandmeldung bezeichnet. Dementsprechend umfaßt die indirekte Brandmeldung die Meldung durch automatische Brandmeldeanlagen oder durch anwesende Personen in Nachbarbereichen bzw. Nachbarräumen und durch indirekte Hinweise aufgrund anlagentechnischer Ausfälle.

##### - Personelle Brandmeldung

Die mittleren Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Anforderung für die personelle Brandmeldung sind in Tabelle 3.5/1 dargestellt. Sie sind direkt von der Anwesenheit von Personen in betroffenen bzw. benachbarten Raumbereichen abhängig. In der Brandentstehungs-/Brandausbreitungsphase ist nur die direkte Brandmeldung relevant, während die Werte für die Vollbrandphase auch die indirekte personelle Brandmeldung umfassen.

##### - Automatische Brandmeldung

###### • direkte Brandmeldung:

Die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung während der Brandentstehungs-/Brandausbreitungsphase beträgt  $7,9 \cdot 10^{-2}$ .

Tab. 3.5/1:

Ausfallwahrscheinlichkeit der personellen Brandmeldung pro Anforderung

Raum bzw. Raumbereich	Direkte Brandmeldung in der Brandentstehungs-/ Brandausbreitungsphase	Direkte und indirekte Brandmeldung in der Vollbrandphase <sup>1)</sup>
Personen dauernd anwesend	1,0 E-1	1,0 E-3
Personen die überwiegende Zeit anwesend	8,0 E-1	2,0 E-2
Personen etwa 1/3 der Zeit anwesend	9,9 E-1	2,0 E-1
Personen nur selten anwesend	1,0	5,0 E-1

<sup>1)</sup> Beinhaltet auch die Brandmeldung aus benachbarten Bereichen

- indirekte Brandmeldung:

Die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung für automatische Brandmeldeanlagen aus benachbarten Räumen in der Vollbrandphase beträgt 2,0 E-1.

- Hinweise auf Brände durch anlagentechnische Ausfälle

Die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit für Hinweise auf Brände durch anlagentechnische Ausfälle beträgt 6,0 E-1 pro Brandfall.

- Brandschutztüren

Die Brandschutztüren werden unterschieden in solche, die betrieblich geschlossen sind und in Türen, die betrieblich über Feststellanlagen (Haltemagnet) offengehalten werden.

- Brandschutztür betrieblich geschlossen:

Die Ausfallwahrscheinlichkeiten pro Anforderung für die Funktion "Brandschutztür im Brandfall geschlossen" liegen zwischen 0,05 für selten begangene Räume und maximal 0,1 für häufig begangene Räume.

- Brandschutztür betrieblich offen:

Die Feststellanlage betrieblich offenstehender Brandschutztüren wird über direkt zugeordnete Brandmelder gesteuert. Die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung für die Funktion "Brandschutztür (mit Feststellanlage) im Brandfall geschlossen" wird durch die Ausfallwahrscheinlichkeit der Auslösung der Feststellanlage bestimmt. Diese wird mit 0,01 pro Anforderung bewertet.

● Brandschutzklappen

Die Brandschutzklappen im Brandfall können entweder automatisch über Schmelzlotsicherungen mit einer Ansprechtemperatur von in der Regel 72 °C oder manuell vor Ort geschlossen werden. Die manuelle Auslösung vor Ort ist entsprechend dem Punkt "manuelle Auslösung und Inbetriebnahme von Brandschutzmaßnahmen" zu bewerten.

Die Bewertung der Funktion "Brandschutzklappe geschlossen" ist nicht nur von der Zuverlässigkeit des Auslösemechanismus, sondern auch vom Erreichen der erforderlichen Auslösetemperatur abhängig. Für die Abluftklappe ist das technische Versagen dominierend. Die gesamte Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt 0,1 pro Anforderung. Für die Zuluftklappe ist das Erreichen der Temperatur am Einbauort entscheidend. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Funktion "Zuluftklappe bei Brand geschlossen" wird durch die Ventilationsbedingungen im Raum beeinflusst und beträgt ca. 0,6 pro Anforderung (Brandschutztür geschlossen) bzw. 0,9 pro Anforderung (Brandschutztür offen).

● Brandbekämpfung

Im folgenden wird zwischen manueller Brandbekämpfung durch Betriebspersonal, manueller Brandbekämpfung durch Feuerwehr und Brandbekämpfung mit stationären Löschanlagen unterschieden.

Die Brandbekämpfung innerhalb des Brandraumes durch anwesendes Betriebspersonal mittels tragbarer Handfeuerlöcher bzw. durch den Einsatz von Wandhydranten oder auch manuell auslösbarer stationärer Löschanlagen, mit dem Ziel, den Brand zu löschen, wird als direkte Brandbekämpfung bezeichnet.

Der Begriff indirekte Brandbekämpfung wird verwendet, wenn die Brandbekämpfung nur das Ziel hat, den Brand auf den betroffenen Raum bzw. auf das direkt vom Brand betroffene Objekt zu begrenzen und die angrenzenden Räume bzw. Raumbereiche sowie die dort vorhandenen Systeme, z.B. durch Kühlung, zu schützen.

- Manuelle Brandbekämpfung durch Betriebspersonal

Die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung für die manuelle Brandbekämpfung in der Brandentstehungs-/Brandausbreitungsphase durch Betriebspersonal wird entscheidend durch die Verzugszeit zwischen Brandmeldung und beginnender Brandbekämpfung beeinflusst. Sie ist außerdem von der Art der Brandmeldung abhängig, da für die personelle Brandmeldung davon ausgegangen wird, daß die meldende Person im Prinzip die Brandbekämpfung direkt aufnehmen kann, während bei automatischer Brandmeldung in jedem Fall Verzugszeiten auftreten.

Unter Voraussetzung einer personellen Brandmeldung beträgt die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit 0,05 pro Anforderung für die direkte manuelle Brandbekämpfung

Bei automatischer Brandmeldung beträgt die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit der direkten manuellen Brandbekämpfung pro Anforderung 0,05/0,1/0,8/1 für Verzugszeiten von 1/3/10/>10 Minuten.

- Manuelle Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

Für den Löscherfolg der Feuerwehr ist die Verzugszeit zwischen dem Beginn der Vollbrandphase (Brandausbreitung auf den gesamten Brandraum) und dem Beginn der Brandbekämpfung maßgeblich. Die Brandbekämpfung wird als ausgefallen betrachtet, wenn es der Feuerwehr nicht gelingt, den Brand auf den ursprünglichen Brandherd zu begrenzen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung beträgt 0,3/0,4/0,5 für Verzugszeiten - Zeitdifferenz zwischen Beginn der Vollbrandphase und beginnender Brandbekämpfung - von 3/10/>10 Minuten.

- Brandbekämpfung mit stationären Löschanlagen

Den Gegebenheiten in Kernkraftwerken entsprechend werden nur Daten für CO<sub>2</sub>-Löschanlagen und Sprühwasserlöschanlagen angegeben.

- Direkte Brandbekämpfung:  
Die mittleren Ausfallwahrscheinlichkeiten (kein Löscherfolg) pro Anforderung betragen 0,2 für CO<sub>2</sub>-Löschanlagen und 0,1 für Sprühwasserlöschanlagen.
- Indirekte Brandbekämpfung:  
Die mittleren Ausfallwahrscheinlichkeiten (nur technisches Versagen) pro Anforderung betragen 0,1 für CO<sub>2</sub>-Löschanlagen und 0,07 für Sprühwasserlöschanlagen.

● Manuelle Auslösung und Inbetriebnahme von Brandschutzmaßnahmen

Folgende Brandschutzmaßnahmen werden manuell ausgelöst bzw. in Betrieb genommen:

- Schließen der Brandschutzklappen vor Ort,
- Öffnen oder Schließen von Klappen der Rauch- und Wärmeabfuhranlage (RWA),
- Inbetriebnahme der maschinellen RWA-Anlage,
- Auslösung von stationären Löschanlagen vor Ort (oder in der Warte).

Die manuelle Auslösung oder Inbetriebnahme solcher Maßnahmen muß im Einzelfall unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit im Brandfall und der Einschätzung des Verhaltens des Betriebspersonals auch unter Berücksichtigung der Streßsituation im Brandfall bewertet werden. Für die Ausfallwahrscheinlichkeiten liegen typische Werte nach Expertenbefragungen zwischen 0,1 und 0,5 pro Anforderung.

### 3.6 Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit passiver Brandschutzeinrichtungen

Die Ausfallwahrscheinlichkeit passiver Brandschutzeinrichtungen wird unter verschiedenen Aspekten behandelt, insbesondere

- welche Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen im Rahmen des konventionellen baulichen Brandschutzes zu stellen sind und welche zusätzlichen Anforderungen gegebenenfalls bei Kernkraftwerken aus sicherheitstechnischen Gründen hinzukommen,

- welche Aussagen zur Ausfallwahrscheinlichkeit kritischer Bauteile, wie Türen, Brandschutzklappen, Kabelschotts oder leichte Trennwände, sich aus einer statistischen Auswertung der Prüfergebnisse von Normbrandversuchen herleiten lassen und wie diese Aussagen auf natürliche Brandverläufe in Raumbereichen eines Kernkraftwerks angewendet werden können,
- welche Ausfallwahrscheinlichkeiten sich aus probabilistischen Zuverlässigkeitsuntersuchungen von massiven Bauteilen bei Vorgabe von Normbrandverläufen und natürlichen Brandverläufen ergeben und welche Schlüsse hieraus im Hinblick auf die Übertragbarkeit von Normbrandergebnissen auf natürliche Brände und auf die maßgebenden Unsicherheitsquellen bei der Ausfallwahrscheinlichkeit zu ziehen sind.

Die konventionellen Anforderungen an passive Brandschutzeinrichtungen sind in DIN 4102 konkretisiert. Sie bestehen aus verschiedenen Kriterien für Standsicherheit unter Eigenlast und gegebenenfalls Nutzlast, besonderer Festigkeit gegen Trümmerlasten bei raumabschließenden Wänden bzw. Brandwänden, Raumabschluß und Begrenzung der mittleren und maximalen Temperaturerhöhung auf der feuerabgekehrten Seite. Bei Feuerschutztüren und Brandschutzklappen kommen noch Prüfungen zur Funktionsfähigkeit hinzu. In bestimmten Bereichen eines Kernkraftwerkes haben raumabschließende Bauteile zusätzliche Aufgabenstellungen zu erfüllen, zum Beispiel Dichtheit hinsichtlich Strahlenschutz oder Sicherungsfunktion. Wenn diese Bauteile auch Brandschutzanforderungen genügen müssen, muß eine mögliche Überlagerung der Anforderungen im Einzelfall geprüft werden. Dies gilt auch für zusätzliche Anforderungen an passive Brandschutzeinrichtungen aus Einwirkungen von innen (EVI), z.B. Strahlkräfte, oder von außen (EVA), z.B. Erdbeben. Hierbei wären negative Veränderungen bezüglich konventioneller Anforderungen, z.B. Schwächung des Raumabschlusses durch Rißbildung und Verformungen infolge von Erdbeben, zu betrachten.

Die statistischen Auswertungen der Normbrandversuche haben gezeigt, daß bei allen obengenannten kritischen Bauteilen die maximale Temperaturerhöhung auf der feuerabgekehrten Seite für das "Versagen" im Normbrandversuch maßgebend ist. Für die nach diesem Versagenskriterium erhaltenen Feuerwiderstandsdauern bei Normbränden wurden aus den Versuchsergebnissen die statistischen Kennwerte Mittelwert, Stan-

dardabweichung und Variationskoeffizient berechnet; außerdem wurde die Ausfallwahrscheinlichkeit bei Erreichen der Nennfeuerwiderstandsdauer (Feuerwiderstandsklasse) bestimmt (Tabelle 3.6/1). Eine Übertragung der Normbrandergebnisse auf natürliche Brände muß neben der Höhe der Raumtemperatur auch deren Einwirkungsdauer berücksichtigen, zumal wenn die Temperaturerhöhung auf der feuerabgekehrten Seite für das Versagen maßgebend ist. Daher wird aus den Normbrandversuchen das Zeitintegral über die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) bis zum Versagenszeitpunkt  $t^*$  als Ausdruck für die ertragbare "Wärmeenergie" bestimmt. Aus diesem Zeitintegral kann bei einem natürlichen Brandverlauf der Zeitpunkt  $t_n^*$  berechnet werden, nach dem ein Überschreiten des im Normbrandversuch maßgebenden Versagenskriteriums zu erwarten ist.

Tab. 3.6/1:

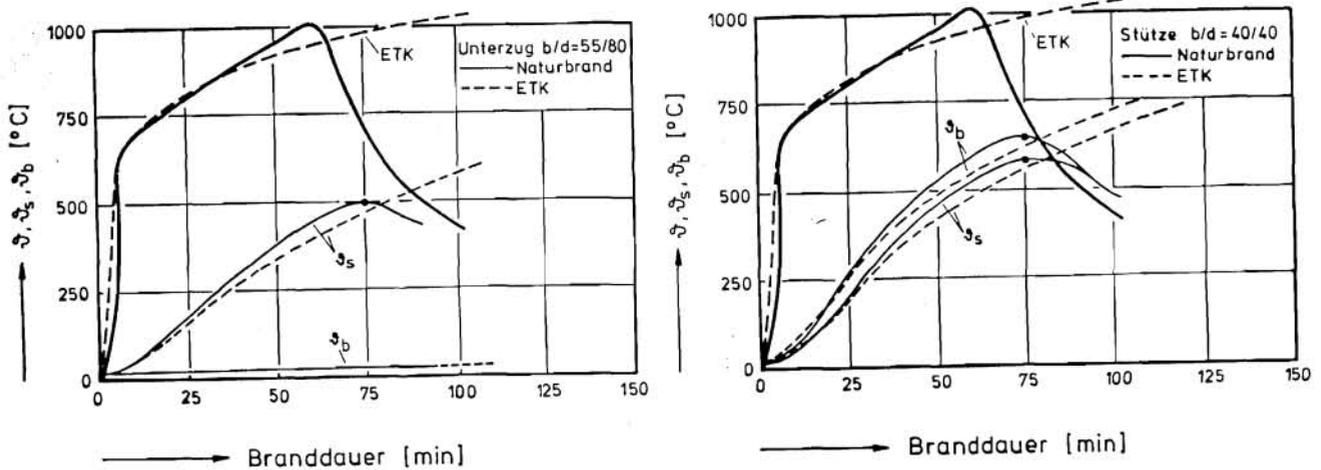
Statistische Kennwerte (Mittelwert  $m_{tf}$ , Standardabweichung  $\sigma_{tf}$ , Variationskoeffizient  $V_{tf}$  und Nennwertfraktile  $P_N$ ) der Feuerwiderstandsdauern passiver Brandschutzeinrichtungen

Bauteil	Bauart	Feuerwiderstandsklasse	Kennwert			
			$m_{tf}$ [min]	$\sigma_{tf}$ [min]	$V_{tf}$	$P_N$ [%]
Feuerschutztür		T90	115	28	0,24	19
		T30	33	3,4	0,10	19
Brandschutzklappe		K90	96	10,6	0,11	28
		K60	71,5	17,6	0,25	-
		K30	47	11,2	0,24	6
		K90 <sup>1)</sup>	103	16,5	0,16	8
Kabelschott	Decke Wand	F120	153	37,5	0,24	19
		F120	143	19	9,13	11
		F90	104	16	0,15	19
Leichte Trennwand		F120	141	1,5	0,01	-
		F90	106	13	0,12	11

<sup>1)</sup> zum Anschluß an Lüftungsleitungen der Baustoffklasse A

Probabilistische Untersuchungen wurden für solche Bauteile durchgeführt, die bei Brand durch Verlust ihrer Standsicherheit unter gegebener Last versagen. Es wurden vier Massivbauteile betrachtet, bei

denen einfache Rechenmodelle für den Tragfähigkeitsnachweis bekannt sind. Die Bauteilabmessungen wurden nach den Gegebenheiten im Schaltanlagegebäude der Referenzanlage gewählt. Hinsichtlich der Systemrandbedingungen und der Auslegung wurden ungünstige Grenzfälle betrachtet. Es zeigte sich, daß die mittleren rechnerischen Feuerwiderstandsdauern beim ETK-Brand in der gleichen Größenordnung liegen wie bei den statistisch untersuchten Bauteilen und daß auch die Streuungen der Feuerwiderstandsdauer vergleichbar sind. Die Zuverlässigkeit



- $\vartheta$  : Raumtemperatur
- $\vartheta_b$  : mittlere Temperatur in der Betondruckzone
- $\vartheta_s$  : mittlere Temperatur in der Zugbewehrung

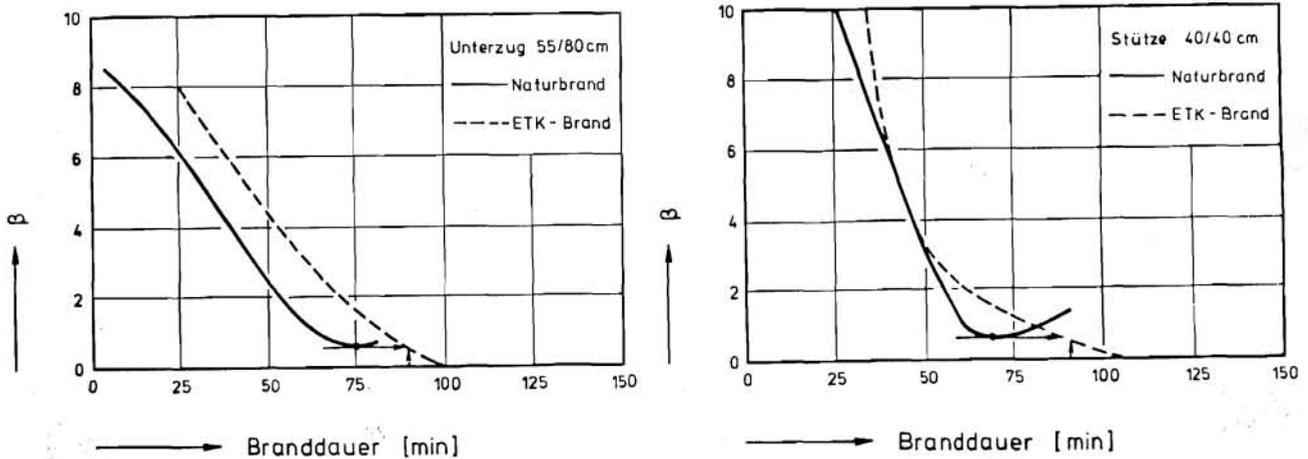


Bild 3.6/1:

Raum- und Bauteiltemperaturen (oben) und Sicherheitsindizes  $\beta$  (unten) eines Stahlbetonunterzuges und einer Stahlbetonstütze im Naturbrand und ETK-Brand.

der Bauteile wurde durch einen Sicherheitsindex  $\beta$  beschrieben, der mit der Ausfallwahrscheinlichkeit  $p_f$  über die Funktion der Standardnormalverteilung direkt verknüpft ist. Der Sicherheitsindex  $\beta$  nimmt bei einem ETK-Brand monoton ab; bei einem natürlichen Brand durchläuft er ein Minimum, wenn die Bauteiltemperaturen maximal werden (Bild 3.6/1). Die Forderung gleiche Ausfallwahrscheinlichkeit  $p_f$  bzw. gleicher Sicherheitsindex  $\beta$  ergibt ein eindeutiges Kriterium zur Ermittlung einer äquivalenten Normbranddauer eines Naturbrandes. Diese Methode zum Vergleich der Wirkungen von Normbränden und Naturbränden ist umfassender als ein Vergleich über die Bauteiltemperaturen oder über das Zeitintegral der Raumtemperaturen, da auch die unterschiedlichen Streuungen von Raumtemperaturen und Gebrauchslasten in Versuch und Realität berücksichtigt werden. In den beiden letztgenannten Vergleichsmethoden müßten aus diesem Grunde strenggenommen die Bauteil- bzw. Raumtemperaturen mit einem Sicherheitszuschlag von ca. 10 % versehen oder gleich als 90 %-Fraktile bestimmt werden.

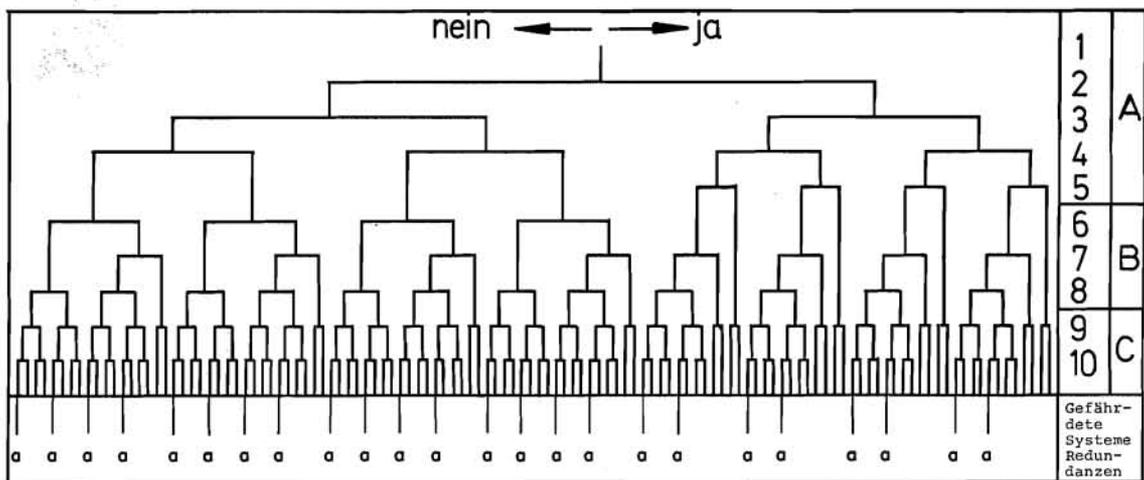
Als wesentliche Unsicherheitsquellen bei den Tragfähigkeitsnachweisen temperaturbeanspruchter Bauteile haben sich die Raum- und Bauteiltemperaturen, die Nutzlast und die Stahlfließgrenze der Bewehrung herausgestellt. Bei natürlichen Bränden dominieren eindeutig die Unsicherheiten des Temperatur-Zeit-Verlaufes aufgrund streuender Brandlasten sowie ungewisser Ventilations- und Abbrandraten.

### 3.7 Quantifizierung von Brandereignisabläufen

Ausgehend von der Zielsetzung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Vorgehensweise und unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit wurden zur Beschreibung und Quantifizierung der Brandereignisse zwei Berechnungsverfahren, ein abgekürztes und ein detailliertes, verwendet. Das Verfahren zur abgekürzten Ermittlung der brandbedingten Ausfallhäufigkeiten von sicherheitstechnisch wichtigen Systemen (Redundanzen) bzw. zur Ermittlung der Auswirkungen auf aktivitätsführende Komponenten ist in Abschnitt 3.7.1 dargestellt. Die detaillierte Vorgehensweise zur Beschreibung der Brandereignisse unter Berücksichtigung der zeitlichen Abhängigkeit der Brandschutzmaßnahmen und der Brandwirkungen ist in Abschnitt 3.7.2 erläutert.

### 3.7.1 Vereinfachte Ereignisablaufanalyse

Für die Ermittlung der brandbedingten Ausfallhäufigkeiten von Systemen bzw. Komponenten in einem Brandraum sowie für den Ausfall zusätzlicher Systeme bzw. Komponenten in benachbarten Raumbereichen wird das in Bild 3.7/1 dargestellte brandspezifische Ereignisablaufdiagramm zugrunde gelegt. Dieses Diagramm kann sich entsprechend den jeweils geltenden Randbedingungen im Einzelfall wesentlich vereinfachen (siehe Fachband 3, Abschnitt 3.2).



A Brandentstehungs-/Brandausbreitungsphase

- 1 Brandentstehung
- 2 Brandmeldung (direkt)
- 3 Raumabschluß
- 4 Lüftungsabschluß
- 5 Brandbekämpfung (direkt)

B Vollbrandphase

- 6 Brandmeldung (indirekt)
- 7 Brandbekämpfung (indirekt)
- 8 Brandabschnittsbegrenzung der Verhinderung der Brandausbreitung

C Schutz von Systemen

- 9 Schutz der Systeme im Raum oder Redundanz
- 10 Schutz von Systemen in Nachbarräumen oder Schutz der übrigen Redundanzen im Brandraum

a: kritischer Ereignisablaufpfad

Bild 3.7/1:

Brandspezifisches Ereignisablaufdiagramm für die vereinfachten Ereignisablaufanalysen

Die Zuverlässigkeit der aktiven Brandschutzmaßnahmen wird, ausgehend von den in Abschnitt 3.5 aufgezeigten Daten über einzelne Wirkungskomponenten, mit Hilfe von Fehlerbäumen bestimmt. Die Zeitabhängigkeit der brandspezifischen Ereignisabläufe wird dabei, soweit möglich,

punktuell in den einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten erfaßt. So liegen zum Beispiel für den Ausfall der manuellen Brandbekämpfung Zahlenwerte in Abhängigkeit von der Verzugszeit zwischen Brandentstehung und beginnender Brandbekämpfung vor. Zusätzlich wird jeweils im Einzelfall geprüft, welche Temperaturen im Brandraum zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme bzw. Inangriffnahme der Brandschutzmaßnahmen herrschen und ob die zu untersuchenden Komponenten zu diesem Zeitpunkt noch funktionsfähig sind. Die manuelle Brandbekämpfung zum Beispiel wird als ausgefallen betrachtet, wenn zum Zeitpunkt des Löschangriffs die Temperaturen im Brandraum für eine manuelle Brandbekämpfung zu hoch oder aber die zu schützenden Komponenten zu diesem Zeitpunkt bereits ausgefallen sind.

Die Beurteilung der temperaturbedingten Ausfälle der passiven Brandschutzmaßnahmen (Türen, Schotts usw.) sowie die Beurteilung der möglichen Brandausbreitung und der temperaturbedingten Ausfälle von Komponenten und Systemen erfolgt anhand der sich einstellenden Raumtemperatur-Zeitverläufe. Die Häufigkeiten für die einzelnen Ereignisabläufe werden durch Multiplikation der Eintrittshäufigkeiten und der bedingten Wahrscheinlichkeiten der Einzelmaßnahmen berechnet, wobei eine Unabhängigkeit der Einzelmaßnahmen voneinander angenommen wird. Die Häufigkeit für eine bestimmte Auswirkung ergibt sich aus der Summation der Beiträge der zugehörigen Ereignisablaufpfade.

### 3.7.2 Detaillierte Ereignisablaufanalyse

Es wurde eine Methode zur Analyse brandspezifischer Ereignisabläufe entwickelt, die den speziellen Problemen der Zeitabhängigkeit (über den Brandverlauf) und der gegenseitigen Abhängigkeit der Gegenmaßnahmen (über die Brandwirkungen und die zeitliche Abfolge) hinreichend Rechnung trägt. Die Methodik umfaßt folgende Einzelschritte:

- Darstellung der zeitlichen Abfolge der Ereignisabläufe,
- vereinfachte Beschreibung der Brandwirkungen, insbesondere der Temperatur-Zeit-Verläufe in dem vom Brand betroffenen Raumreich,

- Formulierung von Versagensmodellen (Grenzzuständen) für die aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeit durch gemeinsame Einflußgrößen in den Modellen,
- Zuverlässigkeitsanalysen für die Brandschutzmaßnahmen anhand der definierten Grenzzustände mit dem Ziel, Versagenswahrscheinlichkeiten und deren Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen zu erhalten,
- Ereignisablaufanalysen nach der Zuverlässigkeitsmethode unter Vorgabe der Ergebnisse aus den Zuverlässigkeitsanalysen der Grenzzustände.

Bei der Beschreibung der Brandwirkungen werden lineare Näherungen verwendet, die möglichst genau den Zeitbereich wiedergeben, in dem kritische Auswirkungen der Brandereignisabläufe (z.B. der Ausfall zweier redundanter Sicherheitssysteme) am wahrscheinlichsten sind.

Die für das Versagen der aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen maßgebenden Grenzzustände und Einflußgrößen sind in Tabelle 3.7/1 dargestellt. Sie sind so definiert, daß sowohl statistisch ermittelte Häufigkeiten von Zufallsausfällen voll einfließen als auch die Abhängigkeit von der Zeit (Wirksamkeit nur bei rechtzeitigem Handeln) und der Brandwirkung (temperaturbedingte Ausfälle) erfaßt wird.

Tab. 3.7/1:

Zusammenstellung der Grenzzustände für das brandspezifische Ereignisablaufdiagramm der detaillierten Ereignisablaufanalyse

Lfd. Nr.	Grenzzustand			Teilsystem
	Name	Ausfall bei $Z_i < 0$	Brand	
1	Z <sub>11</sub>	Keine manuelle direkte Meldung		Brandmeldung
2	Z <sub>12</sub>	Keine automatische direkte Meldung		
3	Z <sub>13</sub>	Keine manuelle indirekte Meldung		
4	Z <sub>14</sub>	Keine automatische indirekte Meldung		
5	Z <sub>15</sub>	Keine indirekte Meldung durch Komponentenausfälle		
6	Z <sub>21</sub>	Öffnung unverschlossen		Raumabschluß
7	Z <sub>22</sub>	Keine automatische Auslösung		
8	Z <sub>23</sub>	Technisches Versagen durch Schließvorrichtung		
9	Z <sub>24</sub>	Kein manuelles Schließen		
10	Z <sub>31</sub>	Kein Lüftungsabschluß durch Personal		Lüftungsabschluß
11	Z <sub>32</sub>	Kein Lüftungsabschluß durch Brandläufer		
12	Z <sub>33</sub>	Kein Abschluß von der Warte		
13	Z <sub>34a</sub>	Kein automatischer Lüftungsabschluß	a	
14	Z <sub>34b</sub>	Kein automatischer Lüftungsabschluß	b	
15	Z <sub>35</sub>	Technisches Versagen		
16	Z <sub>41</sub>	Keine RWA-Umschaltung durch Personal		RWA-Betrieb
17	Z <sub>42</sub>	Keine RWA-Umschaltung durch Brandläufer		
18	Z <sub>43</sub>	Keine Lüftungsumschaltung von Warte		
19	Z <sub>44</sub>	Technisches Versagen durch Umschaltung		
20	Z <sub>51</sub>	Keine direkte Brandbekämpfung durch Personal		Direkte Brandbekämpfung
21	Z <sub>52</sub>	Keine direkte Brandbekämpfung durch Brandläufer		
22	Z <sub>53a</sub>	Brandbedingtes Versagen durch manuelle Bekämpfung	a	
23	Z <sub>53b</sub>	Brandbedingtes Versagen durch manuelle Bekämpfung	b	
24	Z <sub>53c</sub>	Brandbedingtes Versagen durch manuelle Bekämpfung	c	
25	Z <sub>53d</sub>	Brandbedingtes Versagen durch manuelle Bekämpfung	d	
26	Z <sub>54</sub>	Technisches Versagen durch manuelle Bekämpfung		
27	Z <sub>55a</sub>	Brandbedingtes Versagen durch stationäre Bekämpfung	a	
28	Z <sub>55b</sub>	Brandbedingtes Versagen durch stationäre Bekämpfung	b	
29	Z <sub>55c</sub>	Brandbedingtes Versagen durch stationäre Bekämpfung	c	
30	Z <sub>55d</sub>	Brandbedingtes Versagen durch stationäre Bekämpfung	d	
31	Z <sub>56</sub>	Technisches Versagen durch stationäre Brandbekämpfung		
32	Z <sub>57</sub>	Löscheinsatz zu spät		
33	Z <sub>61</sub>	Einsatz der indirekten Brandbekämpfung zu spät		Indirekte Brandbekämpfung
34	Z <sub>62</sub>	Technisches Versagen durch indirekte Brandbekämpfung		
35	Z <sub>71a</sub>	Versagen von Komponenten im Raum	a	Schutz von Komponenten im Raum
36	Z <sub>71b</sub>	Versagen von Komponenten im Raum	b	
37	Z <sub>71c</sub>	Versagen von Komponenten im Raum	c	
38	Z <sub>71d</sub>	Versagen von Komponenten im Raum	d	
39	Z <sub>81a</sub>	Versagen der Raumumschließung oder Redundanztrennung	a	Redundanztrennung
40	Z <sub>81b</sub>	Versagen der Raumumschließung oder Redundanztrennung	b	
41	Z <sub>81c</sub>	Versagen der Raumumschließung oder Redundanztrennung	c	
42	Z <sub>81d</sub>	Versagen der Raumumschließung oder Redundanztrennung	d	
43	Z <sub>91a</sub>	Versagen von Komponenten im Nachbarraum oder in -redundanz	a	Schutz von Komponenten im Nachbarbereich
44	Z <sub>91b</sub>	Versagen von Komponenten im Nachbarraum oder in -redundanz	b	
45	Z <sub>91c</sub>	Versagen von Komponenten im Nachbarraum oder in -redundanz	c	Verzögerte Übertragung
46	Z <sub>91d</sub>	Versagen von Komponenten im Nachbarraum oder in -redundanz	d	
47	Z <sub>92</sub>	Brandübertragung im Nachbarraum oder -redundanz (zeitlich)		

Bild 3.7/2 zeigt das zugehörige Ereignisablaufdiagramm (schematisch). Die Indizes a - f kennzeichnen die möglichen unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Verläufe. Diese Unterschiede werden anhand eines konkreten Beispiels in Abschnitt 5.6 (Bild 5.6/1) erläutert.

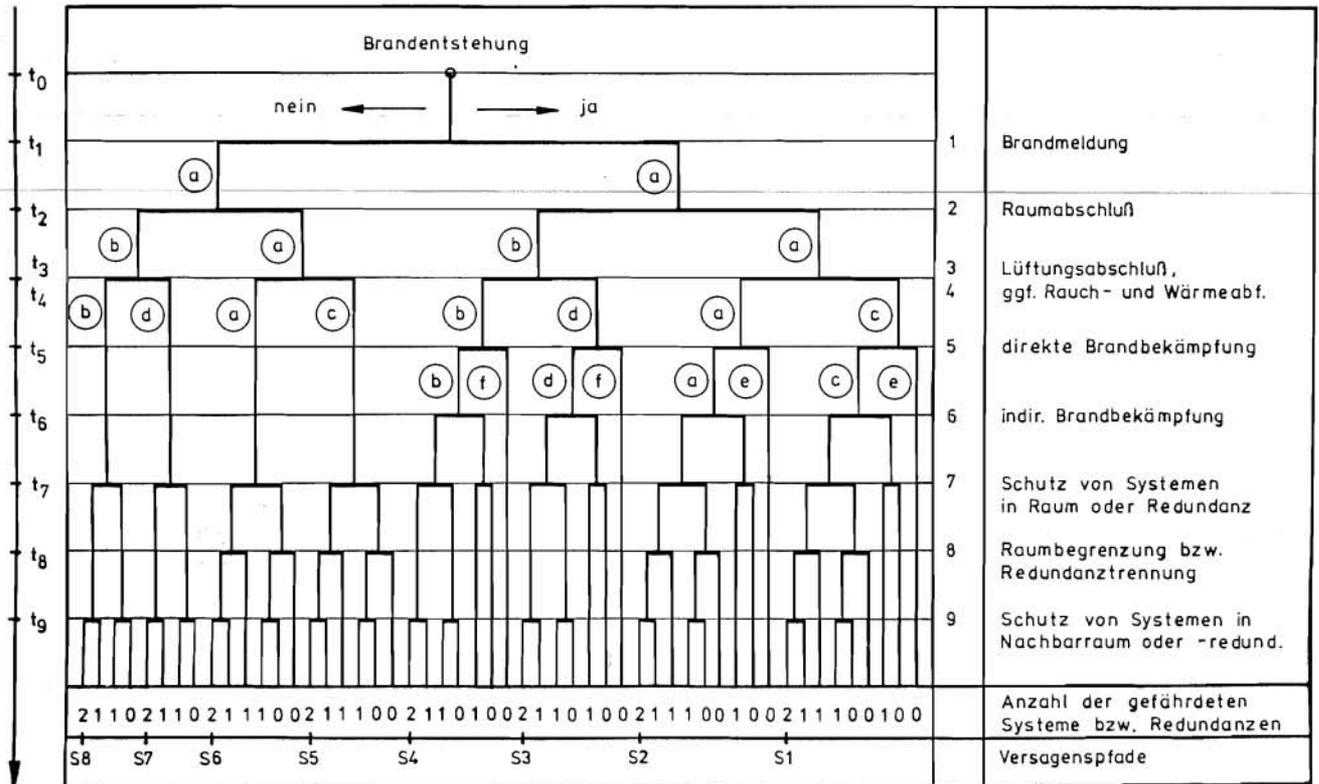


Bild 3.7/2:

Zeitabhängiges brandspezifisches Ereignisablaufdiagramm (schematisch)

In den Zuverlässigkeitsanalysen der Grenzzustände werden zusätzlich zur Versagenswahrscheinlichkeit der Maßnahmen Wichtungsfaktoren berechnet. Sie geben einmal Informationen über die Wichtigkeit der verschiedenen Einflußgrößen für eine bestimmte Brandschutzmaßnahme. Daneben kann auch die Abhängigkeit (Korrelation) verschiedener Brandschutzmaßnahmen beurteilt werden. Diese ist nicht vernachlässigbar, wenn bei verschiedenen Maßnahmen für die gleichen Einflußgrößen große Wichtungsfaktoren errechnet werden.

Die Ereignisablaufanalysen werden analog der Analyse der Grenzzustände durchgeführt, nur daß jetzt die Einzelzuverlässigkeiten der Maßnahmen als Maß für deren "Gewicht" in einem Ereignispfad dienen. Ähnlich läßt sich aus den Zuverlässigkeiten einzelner Ereignispfade auf

deren Bedeutung für das Gesamtsystem aller relevanten Pfade schließen. Als Ergebnis der Ereignisablaufanalysen erhält man die aus der Brandeintrittshäufigkeit und den Versagenswahrscheinlichkeiten der Ereignispfade resultierende Häufigkeit  $p_f$  der unerwünschten Brandfolgen, z.B. des brandbedingten Ausfalls mehrerer Redundanzen eines Sicherheitssystems in Abhängigkeit der Zeit  $t$  nach Brandentstehung. Zusätzlich werden äquivalente Wichtungsfaktoren für die Einflußgrößen in bezug auf das Gesamtsystem ermittelt, deren Quadrate ein direktes Maß für den Beitrag der Einflußgrößen zu  $p_f$  darstellen; damit werden die wichtigsten Einflußgrößen ausgewiesen.

Der besondere Wert dieser Methode liegt darin, daß - anders als bei der klassischen Ereignisablaufanalyse - folgende, für die Optimierung des Brandschutzes unverzichtbare Informationen bereitgestellt werden:

- welcher Ereignisablauf mit der größten Wahrscheinlichkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt zu vorgegebenen Folgen führt, und welche Einzelmaßnahme dieses Ereignisablaufes dessen Eintrittshäufigkeit maßgeblich bestimmt,
- welche Einzelmaßnahmen zu welchem Zeitpunkt eines Brandverlaufes am kritischsten sind, und welche Einflußgrößen hierbei die größte Rolle spielen,
- welchen Einfluß die definierten streuenden Einflußgrößen insgesamt auf das Ergebnis haben,
- welche Bedeutung die gegenseitige Abhängigkeit von Maßnahmen über gemeinsame Einflußgrößen für die Ereignisabläufe hat,
- ob eine näherungsweise Abschätzung der Eintrittshäufigkeiten von Ereignisabläufen (abgekürztes Verfahren) unter Voraussetzung gegenseitiger Unabhängigkeit der Einzelmaßnahmen zulässig ist oder nicht.

## 4. EXPERIMENTELLE GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN

### 4.1 Einzelzielsetzung

Als Ergänzung zu den theoretischen Untersuchungen wurden experimentelle Grundlagenuntersuchungen in Form von Versuchsbränden in Räumen mit vergleichbarer Geometrie (bezogen auf die Referenzanlage) und in Form von Rütteltischversuchen zur Simulierung einer Erdbebenbeanspruchung durchgeführt.

Die Brandversuche dienten einerseits dazu, die Wirkungen realer Brandverläufe in Kernkraftwerken auf Brandabschnitte, Räume und Bauteile zu quantifizieren, andererseits aber auch zur Verifizierung von thermodynamischen Berechnungsmethoden, die aus realistischen Bränden in konventionellen Gebäuden abgeleitet und für die besonderen Randbedingungen in Kernkraftwerken weiterentwickelt wurden.

Das Versuchsprogramm umfaßte zwei Versuchsreihen zur Ermittlung des Abbrandverhaltens verschiedener Kabelisolierungen und Flüssigkeiten, wobei im wesentlichen die Parameter

- Abbrandgeschwindigkeit,
- Brandausbreitung,
- Ventilationsgröße und -richtung sowie
- Zündquelle

untersucht wurden, um die Eingabewerte für die Rechenmodelle zu überprüfen und um sinnvolle Randbedingungen für die Großversuche zu erarbeiten (siehe Abschnitt 4.2).

In Verbindung mit der zweiten Versuchsreihe wurde ein Lüftungskanal zur Untersuchung der Aerosolablagerungen installiert und am Ende dieses Kanals unterschiedliche Filterarten naturgetreuer Größe in den Luftstrom eingebaut. In Abhängigkeit von der Brandlast sollten insbesondere

- Rauchgastemperaturen,
- Ablagerungsverhalten im Kanal bzw. im Filter und
- Druckverhältnisse am Filter

untersucht werden (siehe Abschnitt 4.4).

In den Großversuchen wurden die Auswirkungen von Kabelbränden in Kabelkanälen und in vertikalen Kabelschächten auf den Kanal bzw. Schacht und auf die eingebauten Sonderbauteile wie

- Brandschutztüren,
- horizontale Brandschutzklappen,
- Decken- und Wandabschottungen für Kabeldurchführungen aus Mörtel und Mineralfaser,
- Rohrdurchführungen und
- nichttragende leichte Trennwände

untersucht. Die Normbrandbeanspruchung nach DIN 4102 wurde mit der Beanspruchung aus realen Kabelbränden verglichen (siehe Abschnitt 4.3).

Im Hinblick auf die Erdbebenwirkung auf Brandschutzeinrichtungen wurden Rütteltischversuche an Bauteilen durchgeführt, die im Anforderungsfall brandschutztechnische Funktionen übernehmen müssen. Nach der Erdbebenbeanspruchung wurden die Bauteile dahingehend untersucht, inwieweit ihre Brandschutzfunktion beeinträchtigt worden ist. Die Versuche sollten die Diskussionen um die Lastfallkombination Brand und Erdbeben versachlichen und auf eine abgesicherte Grundlage stellen (siehe Abschnitt 4.6).

#### 4.2 Kleinmaßstäbliche Versuche mit Öl- und Kabelbränden

Die kleinmaßstäblichen Brandversuche dienten unter anderem dazu, das Verhalten ausgewählter Brandlasten zu untersuchen. Ausgangspunkt für die Planung, den Aufbau und die Durchführung der Versuche war die Begehung einer Referenzanlage. Zusätzlich wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Ermittlung von Randbedingungen zur Ergänzung von vorhandenen Wärmebilanzrechenprogrammen,
- Simulation von Bränden, wie sie in ausgewählten Brandräumen oder Raumbereichen der Referenzanlage ablaufen könnten,

- Simulation der Anordnung und Art der Brandlast sowie der Ventilationsbedingungen in Größe und Richtung,
- Simulation von Zündquellen unterschiedlicher Größe.

Es wurden im Rahmen von zwei Versuchsreihen (A und B) 15 Versuche (Tabelle 4.2/1) durchgeführt, wobei Öl und verschiedene Kabelmaterialien als Brandlasten verwendet wurden (siehe auch Fachband 2, Teil A).

Tab. 4.2/1:

Versuchsübersicht

Versuchsreihe	Brandlast	Menge [kg]	Ventilation [m <sup>3</sup> /h]	max. Temperatur [°C]
A	Öl	45	1830	1080
	Öl	72	1830	1190
	Öl	108	1830	1260
	Öl	118	1830	1370
	PVC + Öl	51 + 12	1900	870
	PVC + Öl	55 + 2	1300 - 2600	810
	PVC + Öl	52 + 45	1300 - 2600	1270
B	Öl	16	1750	310
	FRNC/Spiritus	51 + 18	1800	850
	FRNC/Spiritus	34 + 18	1750	790
	Kabelmischung	138	1750	910
	Silikon	232	1750	960
	PVC	150	1750	940
	PVC/Spiritus	60 + 12	1750	930
	PVC/Spiritus	60 + 12	1750	905

Als Brandraum stand ein Versuchsofen des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig mit den Innenabmessungen von 3,5 x 3,5 x 2,6 m (Länge x Breite x Höhe) zur Verfügung. Die Wände des Ofens waren mit Hartschamottesteinen ausgekleidet. Im Deckenbereich war ein Abzug, der in einen Schornstein mündet. Von zwei Seiten konnte stufenlos, variiert mit Hilfe eines Gebläses, Zwangsluft in den Brandraum eingeblasen werden. Der Brandraum hatte zusätzlich eine Tür mit den Abmessungen von 0,8 x 1,2 m für eine natürliche Ventilation. Der Boden des Brandraumes war als Wägebühne ausgebildet, so daß über eine Kraftmeßdose mit Hilfe eines Meßverstärkers der Gewichtsverlust während des Brandes festgestellt werden konnte.

Der Brandraum war in drei Ebenen mit Thermoelementen bestückt. An drei verschiedenen Orten wurde der Druck im Brandraum ermittelt. Im Brandraum selbst wurde nach den Komponenten  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{C}_n\text{H}_m$  eine Rauchgasanalyse durchgeführt. Die Komponenten  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{HCl}$  wurden in abfließenden Rauchgasen im Abzug bzw. bei den Aerosolversuchen im Luftkanal bestimmt. Die Kabelmaterialien wurden auf drei übereinanderliegenden Pritschen angeordnet. Sie hatten jeweils eine Länge von 3 m. Als Kabelmaterialien wurden PVC, Silikon, Teflon und FRNC (halogenfreies Isoliermaterial) verwendet. Als Zündfeuer diente Öl bzw. Spiritus in unterschiedlichen Mengen.

Für die Ölbrandversuche wurde eine Wanne von 1 x 2 m Grundfläche verwendet, so daß sich die ermittelten Abbrandraten auf diese Brandoberfläche beziehen. Bei den Ölbrandversuchen wurden offene Ölwannebrände und Brände nach einem Ölleitungsbruch simuliert.

Es wurden vier Brandversuche mit Ölbrandlasten durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß bei genügender Luftzufuhr Raumtemperaturen erreicht werden, die deutlich über dem Temperaturniveau der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102, Teil 2<sup>1)</sup> liegen. Es wurden im Einzelfall Spitzentemperaturen bis zu 1400 °C gemessen. Die Abbrandrate für Öl hängt von der Öloberfläche und den herrschenden Brandraumtemperaturen ab. Die ermittelten Ergebnisse stimmen mit vergleichbaren Angaben aus der Literatur teilweise überein, wobei einschränkend gesagt werden muß, daß diese Brandversuche im Freien durchgeführt wurden. Bei den vorliegenden Versuchen in geschlossenen Brandräumen wurden größere Abbrandraten erreicht, da die Gesamterwärmung des Systems ein "feed back" auf die Brandlast hervorruft und die Ausgasungsrate erhöht.

Zusammenfassend muß gesagt werden, daß Bauteile, die nach DIN 4102 klassifiziert worden sind, verstärkt gefährdet werden, wenn sich in ihrer unmittelbaren Umgebung ein natürlicher Ölbrand mit großem Öl-vorrat und genügender Luftzufuhr voll entwickeln kann.

---

<sup>1)</sup> nach DIN 4102 werden alle Bauteile beurteilt, die im vorbeugenden Brandschutz verwendet werden.

Mit Kabeln wurden 10 Brandversuche durchgeführt. Die Kabel wurden jeweils auf drei Kabelpritschen angeordnet und durch eine definierte Zündquelle gezündet. Als Versuchsparameter wurden die Ventilation, die Brandlastmenge und -art variiert. Bei entsprechender Brandversuchsanordnung, gesteuert durch die Ventilation, brennt jedes Kabelmaterial eigenständig ab, wenn es vorher durch eine Zündquelle zum Brennen gebracht wurde.

Die Brandausbreitung auf der Kabeloberfläche schwankt stark und hängt von der Menge der Luft ab, die als Ventilation über das Material streicht. Als Ausbreitungsgeschwindigkeit wurden bei den vorliegenden Versuchen größere Werte gefunden, als in der Literatur angegeben sind. Das rührt unter anderem daher, daß Versuche, die der Literatur zugrunde liegen, an Einzelkabeln oder einer dünn belegten Kabelpritsche durchgeführt wurden und dadurch ein "feed back"-Effekt bei der Verbrennung durch die Kabelmassierungen nicht auftreten konnte. Bei Vorwärmung der Kabel auf 150 - 200 °C und genügender Luftzufuhr kann ein schlagartiges Überspringen des Feuers (flash-over) auf der gesamten Kabeloberfläche auftreten, ohne daß es vorher zu deutlichen Brandnebenerscheinungen, wie Rauchentwicklung, kommen muß.

Die Abbrandrate von Kabelmaterialien und somit auch die Heftigkeit eines Brandes hängen von der Menge der vorhandenen Materialien und der Luftzufuhr ab, so daß Brände möglich sind, die in ihrem Temperaturverlauf über der Einheitstemperaturkurve (ETK) nach DIN 4102, Teil 2 liegen.

Bei Bränden mit Kabelmaterialien entsteht starker Rauch, der aggressive und toxische Rauchgasbestandteile, wie  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ , enthält. Ein Oberflächenschutz von Kabelmaterialien durch nichtbrennbares Gewebe oder durch Anstrich mit Dämmschichtbildner verzögert bei dieser Versuchsanordnung geringfügig die Brandausbreitung. Die Kabel brennen aber auf der gesamten Länge ab.

Ein Brand in einem Kabelkanal sollte nicht durch Feuerwehrangegriff bekämpft werden, da der Brandherd aufgrund starker Rauchentwicklung nicht lokalisiert und die Luftzufuhr durch Öffnen der Türen verstärkt werden kann. Bezüglich der Brandbekämpfung sind zwei Vorgehensweisen denkbar:

- aktive Brandbekämpfung mit sofort auslösenden, vorzugsweise automatischen stationären Löschanlagen,
- umgehende und zuverlässige Unterbrechung der Luftzufuhr durch Schließen der Lüftungsklappen.

Werden alle Ventilationsöffnungen geschlossen und die Luftzufuhr über Lüftungsklappen umgehend unterbrochen, geht der Kabelbrand in einen Schwelbrand über und verlöscht gegebenenfalls von selbst. Da dann unzulässige Brandbeanspruchungen für passive Brandschutzmaßnahmen nicht zu erwarten sind, kann eine Brandausbreitung in benachbarte Bereiche mit ziemlicher Sicherheit ausgeschlossen werden. Abweichungen davon sind dann in Betracht zu ziehen, wenn durch die Verqualmung benachbarter Raumbereiche eine Gefährdung des Personals oder wichtiger Einrichtungen möglich ist.

#### 4.3 Großbrandversuche an Kabelkanälen und Kabelschächten

Die Brandversuche an Kabelkanälen und -schächten mit praxisnaher Brandlastbelegung hatten einerseits zum Ziel, die Wärmebilanzmodelle für den rechnerischen Nachweis von Brandverläufen in Räumen von Kernkraftwerken zu verifizieren. Andererseits sollten, bezogen auf die verwendeten Bauteile, die Normbrandbedingungen nach DIN 4102 mit den natürlichen Abbrandbedingungen in Kernkraftwerken verknüpft werden, um die Unsicherheiten abschätzen zu können, die beim Einbau von Normbauteilen in Kernkraftwerken entstehen. Daher wurden die Brandversuche in Räumen mit vergleichbarer Geometrie und mit vergleichbaren Ventilationsbedingungen durchgeführt, und es wurden Bauteile in die Kanäle und Schächte eingebaut, deren Brandverhalten unter Normbrandbedingungen bekannt war.

Als Konsequenz aus den kleinmaßstäblichen Versuchen mit Öl- und Kabelbränden (siehe Abschnitt 4.2) und aus der Literaturlauswertung ergaben sich zwangsläufig Kabelbrandlasten für die Großbrandversuche, da einerseits das Abbrandverhalten von unterschiedlichen Brandlastkonfigurationen schwieriger vorzuberechnen ist als das Abbrandverhalten von brennbaren Flüssigkeiten und daher einer empirischen Bestätigung bedurfte und andererseits gerade Kabel als Zündquelle und

Brandlast in den meisten zur Diskussion stehenden Räumen vorhanden sind.

Die Brandrandbedingungen wurden abgestimmt auf die getroffene Auswahl zu untersuchender Raumbereiche (siehe Abschnitt 5.3), wobei hier die Parameter

- Raumgröße,
- Brandlast und
- Gefährdungspotential

die maßgeblichen Kriterien darstellten. Als Zündquellen wurden Stützfeuer zur Simulation einer Selbstentzündung bzw. eines Brandherdes unter den Kabelbahnen und Brände in Nachbarräumen zugrunde gelegt und als Ventilation die Verhältnisse, die die höchste Brandbeanspruchung im jeweiligen Brandraum erwarten ließen.

Die Brandversuche wurden in einem Deckenbrandhaus (Querschnitt 1,60 x 6,00 m; Höhe 2,20 m) und einem Stützenbrandhaus (Querschnitt 3,60 x 1,40 m; Höhe 5,70 m) durchgeführt (siehe Bild 4.3/1). Besonderer Wert wurde zunächst auf den praxisingerechten Einbau der Kabelbrandlasten auf handelsüblichen Kabelbahnen gelegt. Unter Berücksichtigung einer praxisangepaßten Ventilation waren Abbrandbedingungen im Versuch zu erwarten, die unter ungünstigen Umständen einem Kabelbrand in ähnlichen Räumen in Kernkraftwerken entsprechen.

In die Versuchsaufbauten konnte eine große Anzahl von Bauteilen integriert werden, die den Vergleich der Wirkungen von Normbrand und Kabelbrand ermöglichten. Alle Einbauteile wurden bereits im Normbrandversuch nach DIN 4102 geprüft und erreichten Feuerwiderstandszeiten von mindestens 90 Minuten, so daß bei gleicher Meßstellenanordnung wie im Normversuch ein direkter Vergleich möglich war. Eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche ist der Tabelle 4.3/1 zu entnehmen.

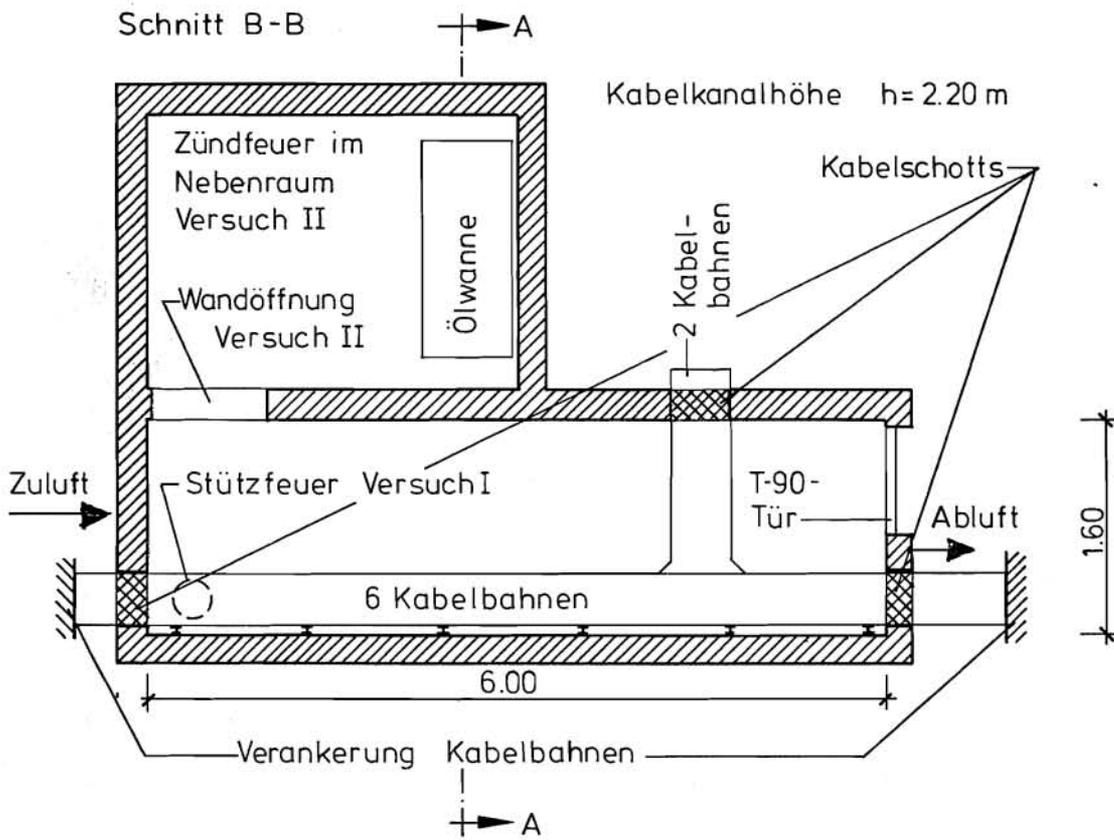
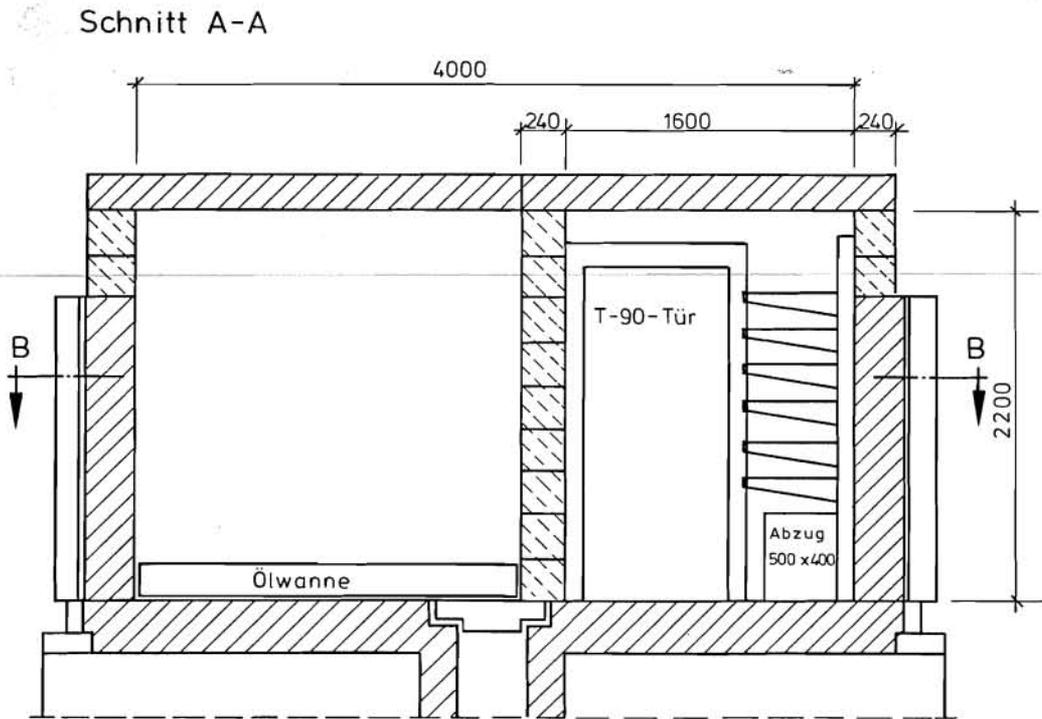


Bild 4.3/1:  
Versuchsaufbau Kabelkanal

Tab. 4.3/1:

Großbrandversuche an Kabelkanälen und Kabelschächten

Versuch	Brandlast	Zündung	Eingebaute Bauteile
Kanal 1	6 Pritschen PVC-Kabel 350 kg PVC	direkt (Stützfeuer) 2 kg Heizöl und 0,5 l Benzin	1 Stahltür T90 3 MF-Schotts (Wand) 1 Mörtelschott (Wand)
Kanal 2	3 Pritschen PVC-Kabel 270 kg PVC	indirekt (Feuer im Nebenraum) 285 kg Öl	-
Schacht 1	6 Pritschen PVC-Kabel	direkt (Stützfeuer)	1 Stahltür T90 1 Mineralfaser-Wandschacht 1 Mineralfaser-Deckenschott 1 Metallständerwand 1 Stützenstummel IPB 180
Schacht 2	6 Pritschen PVC- und Silikon- Kabel	direkt (Stützfeuer)	1 Stahltür T90 1 Deckenklappe T90 1 Mörtel-Wandschott 1 Mörtel-Deckenschott 2 Rohrdurchführungen 1 Metallständerwand 1 Stützenstummel IPB 180

Als Ergebnis der durchgeführten Versuche wurde neben der Brandentwicklung, den Brandraumtemperaturen, einer umfangreichen Gasanalyse und der Druckmessung im Brandraum insbesondere das Brandverhalten der Einbauten analysiert. Die Einzelergebnisse wurden aufbereitet zur Kontrolle bzw. Verifizierung der entwickelten Rechenmodelle und für den Vergleich zwischen den Auswirkungen des Normbrandes einerseits und des Naturbrandes andererseits auf das Bauwerk und seine Einzelbauteile. Die Ergebnisse sind im Detail im Fachband 2, Teil B dokumentiert.

Bild 4.3/2 zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung von Normbrand und Kabelbrand sowie die jeweiligen Brandwirkungen auf die Oberflächen der Türblätter.

Die bisher aufgestellten Wärmebilanzmodelle wurden an Bränden in ausgewählten Räumen und am tatsächlichen Schadensfeuer in normalen Industrie- und Hochbauten kalibriert. In den zur Diskussion stehenden Bereichen von Kernkraftwerken sind überwiegend Kabel- und Ölbrände unter besonderen Randbedingungen zu erwarten, die mit diesen Rechenmodellen

zumindest nicht ohne Überarbeitung bzw. Überprüfung nachgewiesen werden können. Daher wurden zunächst in den Vorversuchsreihen für Kabel- und Ölbrände Abbrandrate und Abbrandgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den Ventilationsverhältnissen und der Brandlastkonfiguration ermittelt und als Basiswerte in die Wärmebilanzmodelle eingesetzt (siehe Abschnitt 4.2).

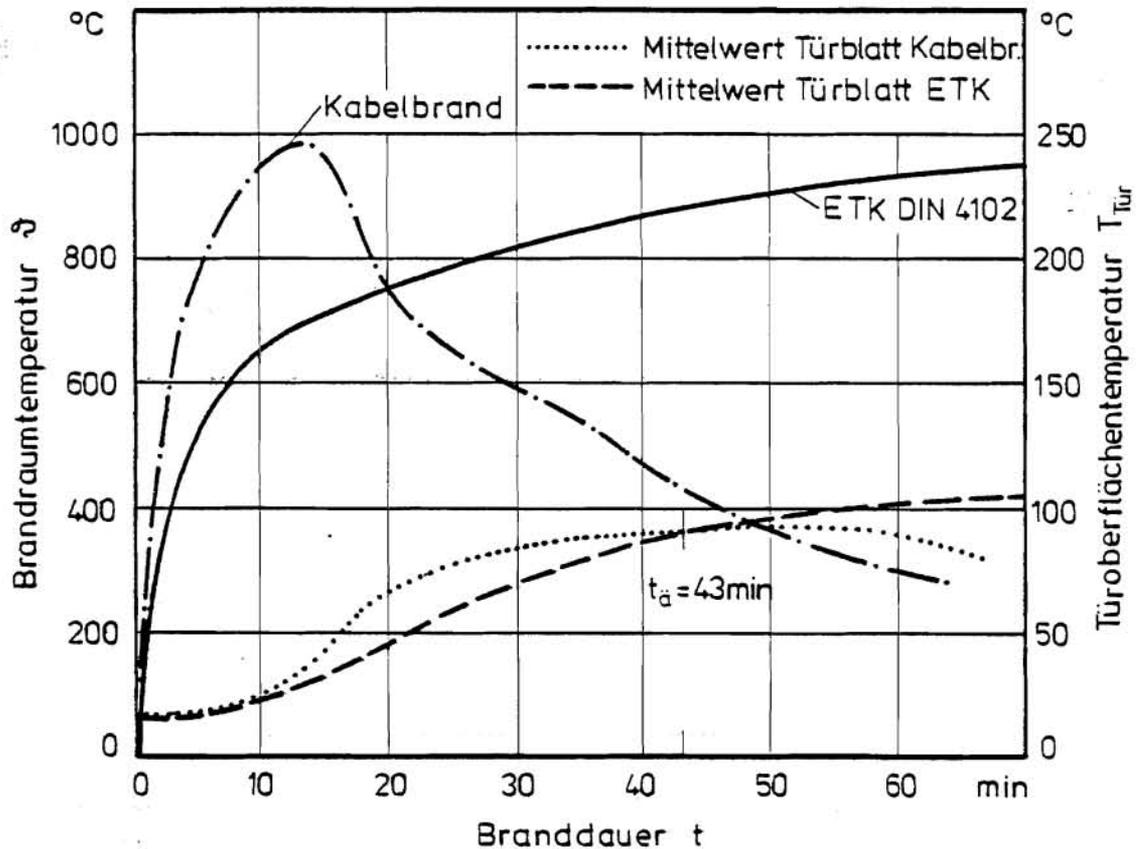


Bild 4.3/2:

Mittlere Temperaturen auf dem Türblatt einer T90-1-Tür

Die mit dem modifizierten Modell errechneten Temperatur-Zeit-Verläufe in den Brandräumen (Bild 3.3/1) stimmten in der Tendenz und in grober Näherung mit den in den Versuchen gemessenen Werten überein, wenn die zeitlich stets eng begrenzte Temperaturspitze im Versuch zugunsten eines breiteren Temperaturmaximums in der Rechnung gekappt wurde (vgl. Abschnitt 3.3).

Da diese Temperaturspitzen einerseits durch Abbrennen von vorzeitigen Ausgasungen erklärbar sind und andererseits keinen wesentlichen

Einfluß auf das Verhalten der beanspruchten Bauteile ausüben, erschien eine weitere Modifizierung des Rechenmodells nicht erforderlich. Ohnehin können Wärmebilanzrechnungen als auch Nachweise nach DIN 4102 nur Näherungsverfahren sein, mit denen die Auswirkung eines natürlichen Brandes dargestellt und die Wertigkeit der getroffenen Maßnahmen verglichen werden kann.

Über den Vergleich der äquivalenten Branddauer<sup>1)</sup> in Versuchen und Rechnungen und über die Auswertung der Gasanalysen läßt sich feststellen, daß auch bei höheren Brandlasten kaum höhere Brandraumtemperaturen zu erwarten sind, daß aber die Branddauer näherungsweise proportional zur Brandlast verlängert wird. Die Auswertung der Versuche läßt auch den Schluß zu, daß die gewählten Wärmebilanzmodelle in der Lage sind, den zu erwartenden Brandverlauf in Kernkraftwerken zu beschreiben und damit möglicherweise den erforderlichen Einbau von passiven Brandschutzeinrichtungen (Rohrdurchführungen, Kabelschotts, Türen usw.) zu optimieren. Über einen rechnerischen Nachweis der äquivalenten Branddauer<sup>1)</sup> können dann nach DIN 4102 geprüfte Bauteile eingesetzt werden.

Die Versuche verdeutlichen, daß gerade in Kernkraftwerken redundanztrennende Bauteile möglichst rauchdicht sein sollten, um die Übertragung zum Beispiel von korrosiven Gasen zu verhindern. Die in den Versuchen eingesetzten luftdichten Türen haben diese Anforderung im Gegensatz zu den bisher bekannten T90-Türen weitgehend erfüllt.

Bild 4.3/3 veranschaulicht, daß die Brandversuche einen realistischen Brandfall in einem Kabelkanal simuliert haben mit realistischen Verformungen der Kabeltrassen.

Die Untersuchungen an den Schotts verdeutlichen, daß in vielen Fällen durchaus der Einsatz von Mineralfaser-Kabelschotts sinnvoll ist, besonders dort, wo temperaturbedingte Verschiebungen der Trasse zu erwarten sind. Gerade bei den Deckenschotts hat sich gezeigt, daß Mör-

---

<sup>1)</sup> Definition gemäß DIN 18230



Bild 4.3/3:

Kabelkanal nach dem Brandversuch

telschotts bei Verschiebung der Kabeltrasse breite Risse aufweisen, während Mineralfaser-Schotts zwar verschoben werden, aber insgesamt dichter bleiben. Unabhängig von der Bauart des Schotts sind bei der Beurteilung der Schottmaßnahmen Aufbau und Verankerung der Kabelbahnen mit zu berücksichtigen. Das gleiche gilt auch für die Beurteilung von Rohrabschottungen.

#### 4.4 Brandversuche zur Aerosolablagerung

Bei Brandereignissen im Kontrollbereich kommt der Frage, wie sich Rauchgase und Brandaerosole in den Abluftkanälen der Lüftungsanlagen verhalten, hinsichtlich Strahlenschutz und Personenschutz eine besondere Bedeutung zu. Je nach Temperatur der Fortluft und ihrer Beaufschlagung mit Rauchgas und Brandaerosolen kann es notwendig werden, bei einem Brand die Lüftungsanlage für den Kontrollbereich oder Teilsysteme dieser Anlage abzuschalten und abzusperren, um Einrichtungen zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe (Schwebstofffilter, Aktivkohlefilter, Strahlenschutzinstrumentierungen oder Komponenten der Lüftungsanlage, z.B. Ventilatoren) vor unzulässigen Beeinträchtigungen zu schützen.

Zur Beantwortung der in diesem Zusammenhang anstehenden Fragen (siehe Fachband 2, Teil C) sollten die im Rahmen des Vorhabens aus anderen Gründen vorgesehenen Brandversuche zusätzlich, soweit wie möglich, genutzt werden. Dabei galt es, diese Brandversuche ohne Beeinträchtigung ihrer primären Zielsetzung und mit möglichst geringem zusätzlichem experimentellen Aufwand so zu ergänzen, daß Erkenntnisse zum Verhalten von Brandaerosolen gewonnen werden konnten.

Aufgrund der experimentellen Einschränkungen und des begrenzten Untersuchungsumfanges können die durchgeführten Arbeiten nur orientierende Ergebnisse liefern und richtungweisend für weiterführende Arbeiten sein.

Bild 4.4/1 gibt den schematischen Aufbau der Versuchsanordnung wieder, wobei die Art und die Orte der durchgeführten Messungen angegeben sind. Ein auswechselbarer Filter - es wurden nur Schwebstofffilter untersucht - bildete den Abschluß des Luftkanals. Die Funktionsfähigkeit des Filters und das Durchströmen der Rauchgase durch den Filter wurden durch einen nachgeschalteten, stufenlos regelbaren Saugventilator erreicht, mit dem ein Differenzdruck (vor und nach dem Filter) am Filter aufgebaut wurde.

Es wurden acht Brandversuche durchgeführt, bei denen die Aerosolablagerung in Luftkanälen und an Filtern untersucht wurde. Bei einem Versuch wurde eine Ölbrandlast, bei den restlichen sieben wurden unterschiedliche Kabelmaterialien verwendet. Bei den Brandversuchen wurden die Ventilation, die Brandlastmenge und -art sowie die Größe der Zündquelle variiert. Über die Ergebnisse zu den Brandwirkungen ist im Abschnitt 4.2 berichtet worden.

Bei Ölbränden mit geringer Energiefreisetzung wird viel Ruß auf einem Filter realer Größe abgelagert, so daß unter den vorliegenden Versuchsbedingungen nach ca. 10 Minuten die Funktionsfähigkeit des Filters eingeschränkt war. Die Ablagerungen auf den Wänden und bei der isokinetischen Probennahme sowie die Ergebnisse der Rauchgasanalyse zeigten deutlich geringere Werte als vergleichbare Ergebnisse mit Kabelmaterialien.

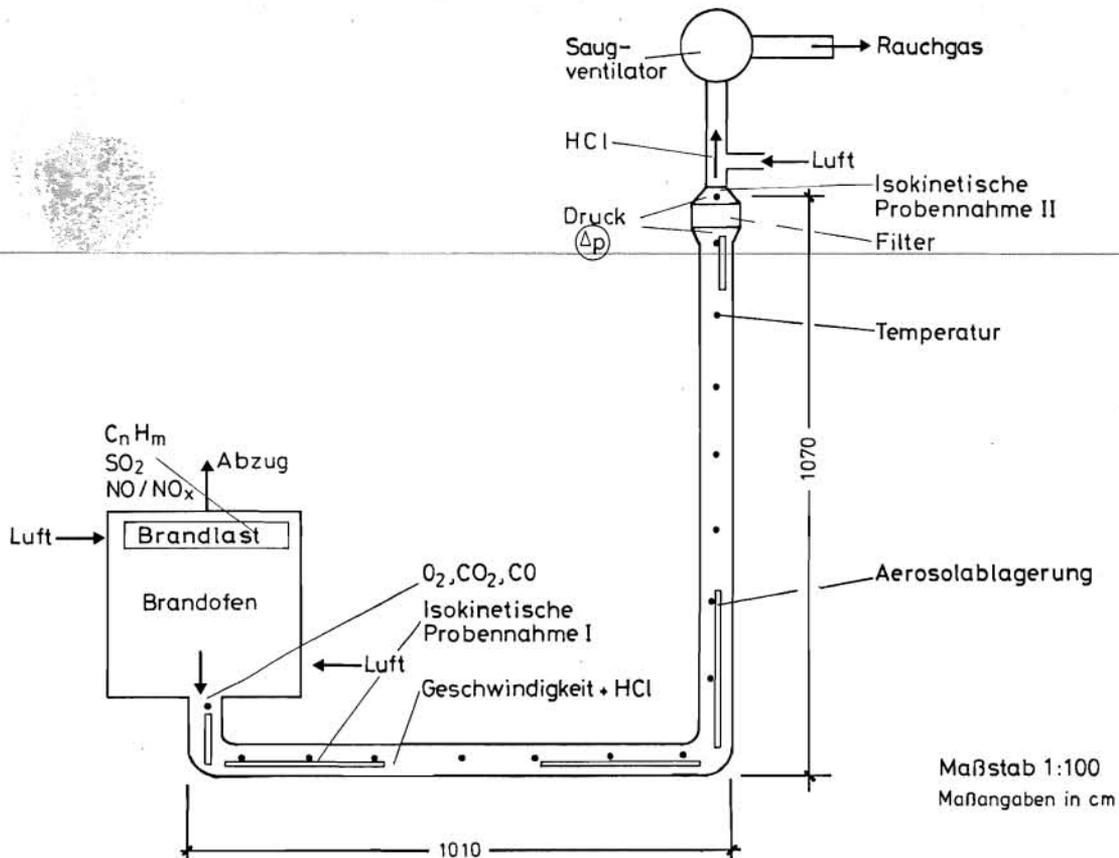


Bild 4.4/1:

Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung

Kabelmaterialien, bis auf FRNC-Kabel, neigen zu starker Rauchentwicklung unter Freisetzung von großen Mengen toxischer und aggressiver Gasbestandteile. Etwa 10 Minuten nach Brandbeginn konnte die Strömung im Luftkanal aufgrund der vorhandenen Versuchsbedingungen nicht weiter voll aufrechterhalten werden. Nach weiteren 8 Minuten war die Funktionsfähigkeit der Filter so stark herabgesetzt, daß lediglich die Hälfte des vorgegebenen Volumenstromes durch den Filter gefördert wurde.

Die verstärkte Freisetzung von Rauch, Aerosolen und aggressiven Rauchgasbestandteilen gegenüber einem Ölbrand zeigt sich in den Meßergebnissen der Aerosolablagerung auf den Luftkanalwänden, in der Gewichtszunahme pro Zeit bei der isokinetischen Probennahme sowie der Rauch-

gasanalyse (siehe Fachband 2, Teil C). Bei der Rauchgasanalyse ist der hohe Anteil an aggressiven und korrosiven HCl-Komponenten zu erwähnen und der noch stärkere Anteil an Kohlenwasserstoffen  $C_nH_m$ , deren Auswirkungen und weitere Reaktionen mit anderen Komponenten unter thermischen Bedingungen derzeit nicht abgeschätzt werden können.

Das Brandverhalten von FRNC-Kabeln zeigt deutlich günstigere Werte im Vergleich zu anderen Kabelmaterialien. Nach Bränden von 45 Minuten Dauer waren die Filter in den Luftkanälen nicht in ihrer Funktionsweise eingeschränkt. Ebenso war die meßbare Aerosolablagerung bei Bränden mit diesem Kabelmaterial im Luftkanal als gering einzustufen.

Durch die vorhandene Versuchsanordnung konnten Differenzdrücke am Filter zwischen 6 und 14 mbar durch einen Saugventilator erzeugt werden. Dieser Meßbereich wurde beeinflußt durch die unterschiedlichen Konstruktionsarten der Filter und den daraus resultierenden Strömungswiderstand sowie die starke Erwärmung der Filter durch die Rauchgase und den dadurch notwendigen thermischen Schutz des nachgeschalteten Saugventilators. Bei größeren Differenzdrücken am Filter, hervorgerufen durch leistungsstarke Gebläse, ist zu befürchten, daß bei Temperaturen von mehr als 100 °C im Filter und starker Beladung der Filter durch Rauchgase aus Kabelbränden die Filter undicht werden und Rußbestandteile nicht aufhalten können. (Aggressive Rauchgaskomponenten, wie  $C_nH_m$ ,  $SO_2$ , HCl usw., werden durch ein Filtersystem nicht aufgehalten.) Die Versuche zur Aerosolablagerung in Luftkanälen und Filtern realer Größe bei Brandversuchen stellen einen ersten Schritt auf diesem Gebiet dar.

Die weiteren Ergebnisse dieser Versuche lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Temperaturen, denen die Filter ausgesetzt waren, lagen generell unter 130 °C und waren damit überraschend niedrig. Ein zeitlicher Verlauf der Filtertemperaturen kann jedoch nicht angegeben werden.
- Die Ablagerungsrate der aerosolförmigen Brandprodukte längs der Abluftstrecke weist keine Systematik auf; die abgelagerten Aerosolmassen können in erster Näherung proportional der Länge der Abluftstrecke angenommen werden.

- Mit einer Aerosolbeladung von 500 bis 870 g ist die Filterbeladbarkeit erschöpft. Dies führte zu Druckverlusten bis zu 2000 Pa und somit zu erhöhter mechanischer Belastung.
  - Die meisten Filter zeigten eine deutliche Reduzierung des Rückhaltevermögens, die im wesentlichen aus dem Eintrag aggressiver, korrosiver Rauchgase und Feuchte resultiert.
- 
- Aus der Filterbeladung können keine Rückschlüsse auf den Gesamtanteil aerosolförmiger Brandprodukte im Brandraum gezogen werden, da ein Teil des Brandabgases - aufgrund notwendiger experimenteller Einschränkungen - direkt über den Kamin abgegeben wurde.

Hinsichtlich der Auswirkungen von Bränden auf die Lüftungstechnischen Einrichtungen im Kontrollbereich eines Kernkraftwerkes lassen sich folgende allgemein geltende Schlußfolgerungen ziehen:

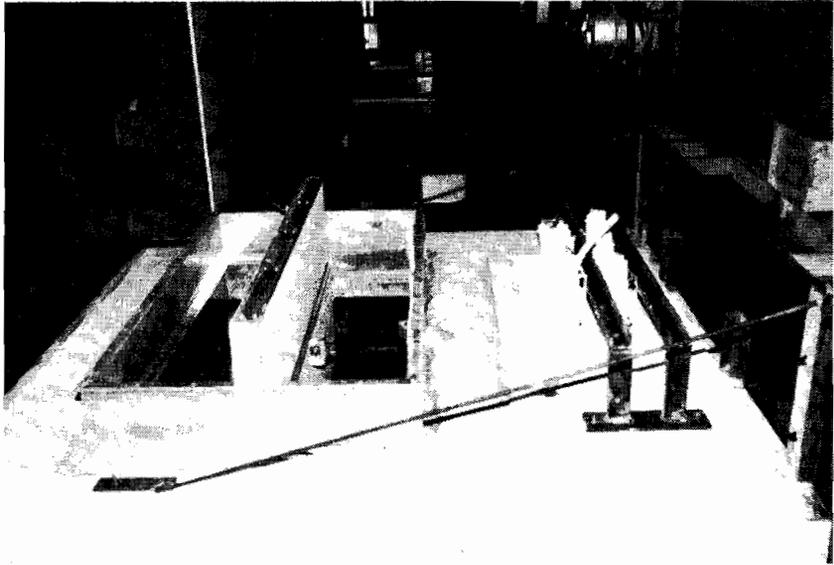
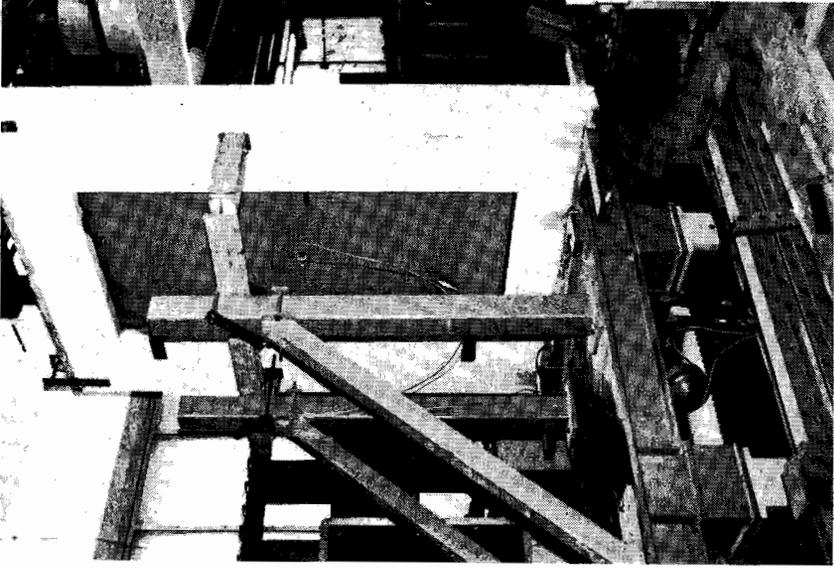
- Es ist grundsätzlich nicht auszuschließen, daß bei bestimmten Brandereignissen, z.B. stark rußende Ölbrände oder PVC-Brände, eine Abschaltung bzw. Absperrung von Lüftungseinrichtungen notwendig werden kann, da eine Beeinträchtigung der Filter möglich ist.
- Unter Berücksichtigung der Verhältnisse im Kernkraftwerk (größtenteils lange Lüftungskanäle, Zumischung kalter Luft aus anderen Raumbereichen) ist eine thermische Belastung der Fortluftanlagen durch heiße Rauchgase nicht zu erwarten, d.h., als kritische Komponente ist der Filter anzusehen.
- Bei Brandereignissen mit ähnlichen Randbedingungen wie in den Versuchen (Brandlast, Lüftungskanallänge) ist die maximale Beladung des Filters nach 10-20 Minuten erreicht. Bei größerer Lüftungskanallänge dürfte diese Zeitspanne wesentlich größer werden.
- Bei Kabelbränden mit FRNC-Kabelmaterial sind keine wesentlichen Beeinträchtigungen der Filter zu erwarten.

#### 4.5 Erdbebenversuche mit Brandschutzeinrichtungen

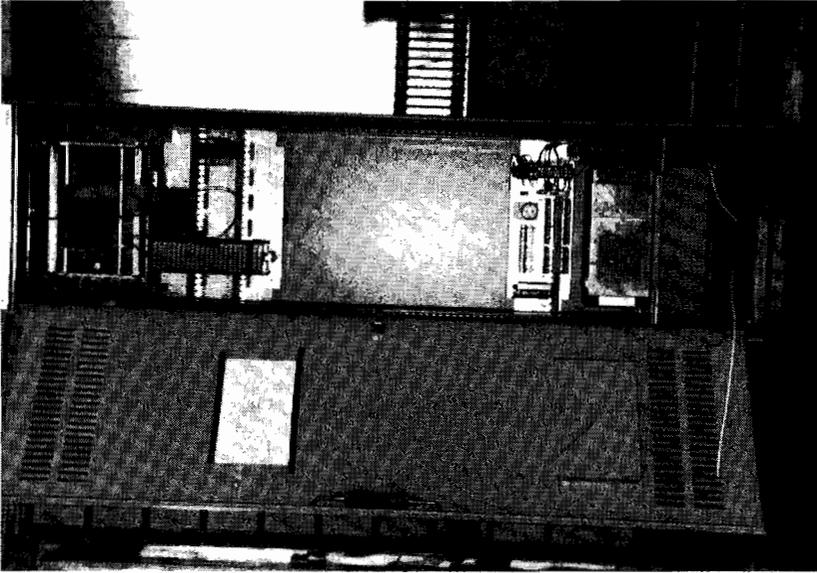
Die durchgeführten Erdbebenversuche hatten zum Ziel, das Verhalten ausgewählter Brandschutzeinrichtungen bei dynamischer Beanspruchung durch realistische Erdbeben zu testen. Die Untersuchungen mußten aus Kostengründen auf solche Brandschutzeinrichtungen beschränkt werden, bei denen neben der reinen Standsicherheit im Hinblick auf die Brandschutzwirkung noch weitergehende Anforderungen an Integrität und Funktionsfähigkeit zu stellen sind. Daher wurden folgende Einrichtungen als repräsentativ ausgewählt: Feuerschutztüren T90 mit zugelassener Feststellanlage, Feuerschutzklappen K90, Kabelschotts F90 sowie ein Brandmeldekern mit Bedienfeld.

Besonderer Wert wurde auf realistische Einbaubedingungen gelegt. Die passiven Brandschutzeinrichtungen wurden daher in Stahlbetonwänden eingebaut, und zwar in einem Fall eine Tür T90-1 mit den Abmessungen 1250 x 2250 mm, im anderen Fall eine Feuerschutzklappe K90 von 1500 x 800 x 500 mm und ein Kabelschott 1000 x 400 x 240 mm. Die Stahlbetonwände wurden jeweils in Längsrichtung und in Querrichtung auf dem Rütteltisch aufgebaut und so befestigt, daß Eigenschwingungen weitgehend vermieden wurden (Bild 4.5/1). Der Brandmeldekern war in einem Stahlschrank 600 x 400 x 2000 mm eingebaut, der in Längs- und Querrichtung auf dem Rütteltisch befestigt wurde (Bild 4.5/2).

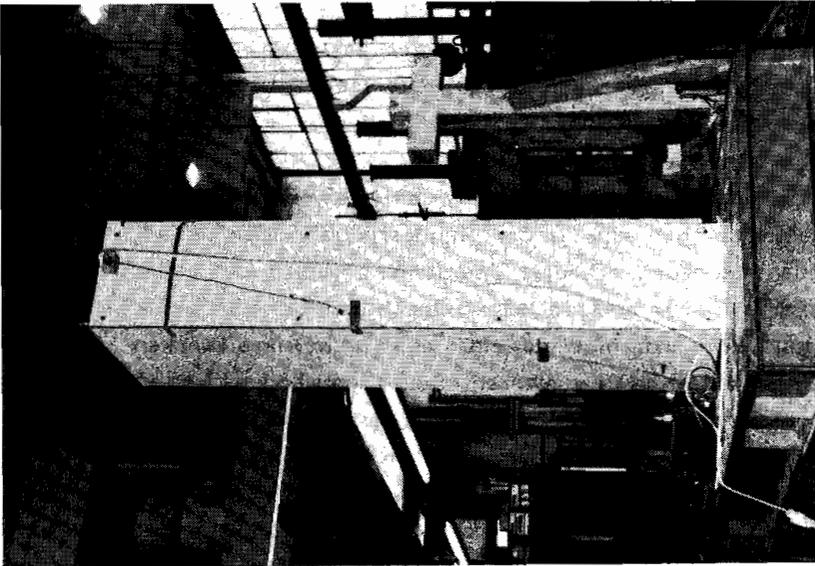
Das Prüfprogramm für die Erdbebenversuche umfaßte Resonanzversuche zur Ermittlung der Übertragungsfunktion zwischen Rütteltisch, Prüfkörper und Einbauteilen, die Erdbebensimulationen mit Beschleunigungs-Zeitverläufen und diverse Standsicherheits-, Integritäts- und Funktionsprüfungen. Für die Erdbebensimulationen wurde im wesentlichen ein Etagen-Beschleunigungszeitverlauf als Erregung verwendet, wie er innerhalb von Kernkraftwerksgebäuden bei den für deutsche Verhältnisse typischen Erdbeben auftreten kann. Dieser Zeitverlauf wurde in den Maximalbeschleunigungen von ca. 0,25·g bis 1,0·g, in einzelnen Fällen auch darüber hinaus gesteigert. Zu Vergleichszwecken wurde bei einigen Prüfkörpern noch ein sehr energiereicher Freifeld-Beschleunigungszeitverlauf mit dem Frequenzgehalt entsprechend dem U.S.AEC-Standardpektrum simuliert. Bei Feuerschutztüren und Feuerschutzklappen wurde außerdem die dynamische Erregung infolge des Schließens gemessen.



**Bild 4.5/1:**  
Aufbau der Prüfwände auf dem Rütteltisch für Längsanregung (links) und Queranregung (rechts)



**Bild 4.5/2:**  
Aufbau des Brandmeldekerns mit Bedienfeld auf dem Rütteltisch für Längsanregung



**Bild 4.5/2:**  
Aufbau des Brandmeldekerns mit Bedienfeld auf dem Rütteltisch für Längsanregung (links) und Queranregung (rechts)

Als Ergebnis (detailliert in Fachband 2, Teil D) der durchgeführten Versuche ist festzustellen, daß alle untersuchten Brandschutzeinrichtungen bei den gegebenen Einbaubedingungen den Erdbebenbeanspruchungen infolge des realistischen Etagen-Zeitverlaufs sowie des untypischen Freifeld-Zeitverlaufs mit Maximalbeschleunigungen bis  $1,0 \cdot g$  standhalten. Die Standsicherheit war in keinem Falle gefährdet. Die für die Brandschutzwirkung wichtige Integrität von Feuerschutztüren, Feuerschutzklappen und Kabelschotts wurde eingehend nach jeder Laststeigerung geprüft. Auch hier ergaben sich keine Beeinträchtigungen durch die dynamische Beanspruchung. Zu einer begrenzten Rißbildung kam es in dem Mineralfaserschott bei Erregung mit dem Freifeld-Zeitverlauf nach Entfernen der Abstützung der Kabelpritsche. Hierdurch geht nach Erfahrungen bei Normbrandversuchen jedoch die raumabschließende Wirkung nicht verloren. Bei den Schließvorrichtungen von Feuerschutztüren und -klappen sowie bei der Brandmeldeanlage wurde auch die Funktionsfähigkeit überwacht. Es zeigte sich, daß Türen und Klappen nach Erdbebenversuchen im geöffneten Zustand einwandfrei schlossen und bei Prüfung im geschlossenen Zustand nicht aufsprangen. Die Feststellanlagen der Türen sowie die mechanischen bzw. elektromagnetischen Festhaltevorrichtungen der Feuerschutzklappen lösten während der Versuche - mit Ausnahme einer Tür auf höchster Laststufe - nicht ungewollt aus. Die Brandmeldeanlage arbeitete während und nach den Erdbebensimulationen vorschriftsmäßig.

Die Erdbebenversuche lassen den Schluß zu, daß die geprüften Brandschutzeinrichtungen alle in der Bundesrepublik Deutschland real zu erwartenden Erdbeben schadlos überstehen, sofern die Einbaubedingungen denen im Versuch entsprechen. Hinsichtlich der passiven Brandschutzeinrichtungen wurde nur der in neueren Kernkraftwerken übliche Fall des Einbaus in relativ starren Stahlbetonwänden betrachtet. Es ist nicht auszuschließen, daß sich die gleichen Bauteile bei anderen Einbaubedingungen - z.B. in Mauerwerkswänden oder leichten Trennwänden bzw. Feuerschutzklappen in Lüftungskanälen außerhalb von Wänden - ungünstiger verhalten. Insbesondere können größere Verformungen zu einer Gefährdung der Integrität oder zu Fehlfunktionen führen. Hier wäre es sicher nützlich, Vergleichsversuche mit veränderten Einbaubedingungen durchzuführen.

## 5. BRANDGEFAHRENANALYSE FÜR EIN KERNKRAFTWERK

### 5.1 Einzelzielsetzung

Die Durchführung einer Brandgefahrenanalyse, wie sie im Kapitel 3 beschrieben ist, sollte am Beispiel eines neueren Kernkraftwerkes demonstriert werden. Dabei wurden mehrere Ziele verfolgt:

- Demonstration der Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Methoden zur quantitativen Beschreibung von Brandgefahren,
- Eingrenzung der Unsicherheiten und Klärung der Anwendungsgrenzen durch Parameterstudien und Vergleichsrechnung mit vereinfachten und genaueren Methoden,
- Bewertung der Wirksamkeit der in neueren deutschen Kernkraftwerken durchgeführten Brandschutzmaßnahmen und Darstellung von Optimierungsmöglichkeiten.

### 5.2 Beschreibung des Kernkraftwerkes

Für die anlagenspezifischen Untersuchungen war es notwendig, ein bestimmtes Kernkraftwerk als Referenzanlage auszuwählen. Dabei sollten Reaktortyp, Leistung, Sicherheitstechnik und brandschutztechnische Auslegung möglichst dem Standard der zur Zeit gebauten oder auch geplanten Anlagen entsprechen.

Als Referenzanlage wurde ein neueres Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (DWR) und einer elektrischen Leistung von 1300 MW ausgewählt. Zweckmäßigerweise wurde die gleiche Anlage gewählt, für die im Rahmen des vorangegangenen Vorhabens SR 144 eine Bestandsaufnahme der brandschutztechnischen Gegebenheiten durchgeführt worden war /ABK 81/.

Die wichtigsten Gebäude eines Kernkraftwerkes mit DWR sind das Reaktorgebäude, das Reaktorhilfsanlagegebäude, das Schaltanlagegebäude, das Maschinenhaus, das Notstromdieselgebäude, das Notspeisegebäude und das Kühlwasserpumpenbauwerk. Bild 5.2/1 zeigt zur besseren Übersicht einen Lageplan der Referenzanlage. Die Anordnung dieser Gebäude unterscheidet sich nur unwesentlich von anderen neueren DWR.

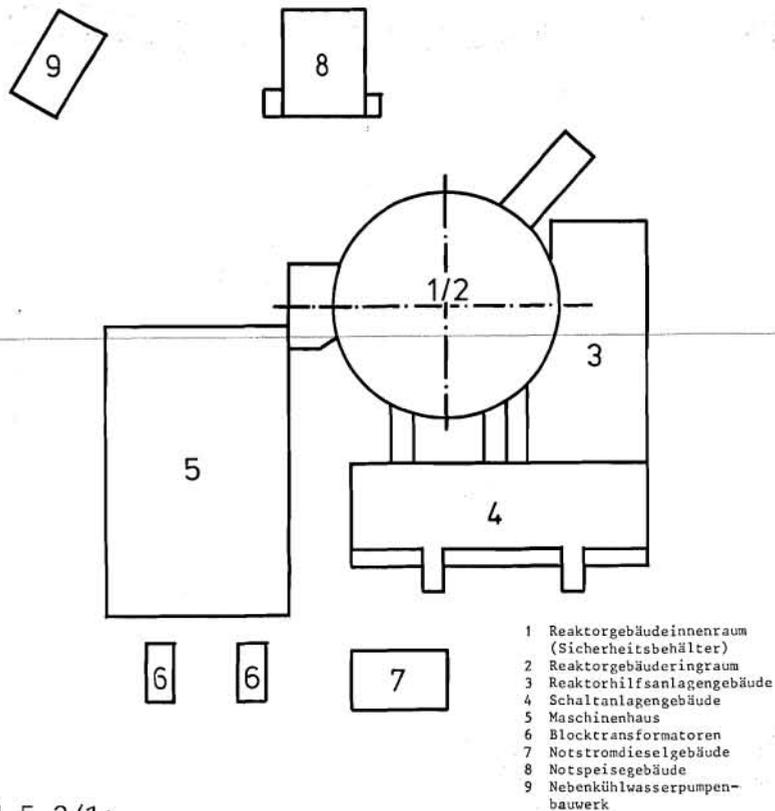


Bild 5.2/1:

Lageplan eines Kernkraftwerkes

Andere Gebäude, wie Kühltürme, Verwaltungsgebäude, Werkstätten, Lager, die in Bild 5.2/1 nicht dargestellt sind, sind für die Analyse von Brandereignissen unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten ohne Bedeutung. Hinsichtlich des Personenschutzes gelten für diese Gebäude die konventionell üblichen Anforderungen.

In den nachfolgenden Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 wird eine Übersicht über die Anlagentechnik und den Brandschutz im Kernkraftwerk gegeben. Die Ausführungen sollen einmal die sicherheitstechnische Bedeutung der jeweiligen Gebäude veranschaulichen und zum anderen die Grundsätze des Brandschutzes in einem Kernkraftwerk erkennen lassen.

### 5.2.1 Anlagentechnik

Im folgenden werden die in Bild 5.2/1 dargestellten Gebäude mit ihren wichtigsten Systemen und Komponenten beschrieben. Dabei wird zum besseren Verständnis auch auf die wesentliche Funktion dieser Systeme und Komponenten eingegangen<sup>1</sup>).

● Reaktorgebäude

Bei diesem Gebäude ist zu unterscheiden zwischen dem Gebäudeteil, der vom Sicherheitsbehälter umschlossen ist, und dem übrigen Gebäudeteil, dem Reaktorgebäude-Ringraum.

Im Sicherheitsbehälter befindet sich der in sich geschlossene Reaktorkühlkreislauf (Reaktordruckbehälter, 4 Hauptkühlmittelpumpen, 4 Dampferzeuger, Druckhalter), auch Primärkreislauf genannt, der die im Reaktor durch Kernspaltung erzeugte Wärme über die Dampferzeuger an den Sekundärkreislauf überträgt. Ein ausreichend hoher Druck des Kühlwassers verhindert eine Dampfbildung im Reaktorkühlkreislauf (daher die Bezeichnung "Druckwasserreaktor") und ermöglicht wegen der intensiven Kühlwirkung eine hohe Leistungsdichte im Brennstoff und im Reaktorkern. Von den Dampferzeugern führen die Rohrleitungen des Speisewasserdampfkreislaufes durch den Sicherheitsbehälter und den Reaktorgebäude-Ringraum zum Maschinenhaus.

Der gasdichte und druckfeste Sicherheitsbehälter dient insbesondere der Rückhaltung radioaktiver Stoffe bei Leckagestörfällen. Er schließt den weitaus größten Teil des Inventars an radioaktiven Stoffen in einem Kernkraftwerk ein.

Im Reaktorgebäude-Ringraum befinden sich die 4fach redundanten Notkühlssysteme. Sie dienen der Einspeisung von Reaktorkühlmittel bei Leckagestörfällen. Die ebenfalls in diesem Gebäudeteil angeordneten 4fach redundanten Nachkühlssysteme dienen der Abfuhr der Nachwärme des Reaktors. Das ist im wesentlichen die Wärme, die nach Abschaltung des Reaktors durch den dann weiterhin noch erfolgenden Zerfall der im Reaktorbetrieb gebildeten radioaktiven Stoffe entsteht. Diese Nachwärme wird aus dem Reaktorkühlkreislauf über den in sich geschlossenen Zwischenkühlkreislauf an den zum Vorfluter hin offenen Nebenkühlwasserkreislauf abgegeben.

---

<sup>1)</sup> Die nachfolgenden Ausführungen sind notwendigerweise sehr gedrängt dargesellt. Um dem Leser eine Vertiefung zu erleichtern, wird auf die Literatur /SMI 79, OLD 74, GRS 80/ verwiesen.

- Maschinenhaus und Blocktransformatoren

Im Maschinenhaus befinden sich wesentliche Teile des Speisewasserdampfkreislaufs (Turbine, Kondensator, Speisewasserpumpen) und der Generator. Die Umwandlung von Wärme in elektrische Energie geschieht bei Kernkraftwerken in gleicher Weise wie bei anderen thermischen Kraftwerken. Die Wärmeabfuhr aus dem Kondensator erfolgt bei der Referenzanlage mit Hilfe des Hauptkühlwassersystems über Kühltürme an die Umgebung. Bei Anlagen mit Druckwasserreaktor, wie bei der Referenzanlage, ist das Maschinenhaus aufgrund der in sich geschlossenen Primär- und Sekundärkreisläufe frei von radioaktiven Stoffen. Deshalb ist die sicherheitstechnische Bedeutung des Maschinenhauses, bei DWR-Anlagen auch hinsichtlich Brandereignissen, geringer einzustufen als bei Anlagen mit Siedewasserreaktor, bei denen der im Reaktor erzeugte Dampf unmittelbar die Turbine antreibt.

Außerhalb des Maschinenhauses befinden sich die Blocktransformatoren, über die die erzeugte elektrische Energie in das Verbundnetz eingespeist wird.

- Schaltanlagegebäude

In diesem Gebäude sind die größtenteils 4fach redundanten elektrischen Einrichtungen zur Regelung, Steuerung und Energieversorgung der Anlage, einschließlich der Kabelverteilungen zu anderen Gebäuden, angeordnet. Dazu gehören insbesondere Teile des automatisch wirkenden Reaktorschutzsystems.

In der in diesem Gebäude befindlichen Warte werden die wichtigsten System- und Regelgrößen angezeigt. Von Hand durchführbare Schalthandlungen erfolgen im wesentlichen von hier aus.

- Reaktorhilfsanlagegebäude

Dieses dem Kontrollbereich zugeordnete Gebäude enthält nukleare Hilfssysteme, die für den Betrieb des Reaktors und der Gesamtanlage notwendig sind. Dazu zählen das Volumenregelsystem, das die Aufgabe hat, Volumenschwankungen im Reaktorkühlkreislauf auszugleichen, und daran angeschlossene Systeme zur Kühlmittelreinigung und zur Chemikalieneinspeisung.

Weiterhin befinden sich in diesem Gebäude die nuklearen Lüftungsanlagen, mit denen ein nach Strahlenschutzgesichtspunkten gestaffelter Unterdruck im Reaktor- und Reaktorhilfsanlagengebäude aufrechterhalten wird, sowie Anlagen zur Abwasserreinigung. Im Kontrollbereich anfallende radioaktive Abfälle, z.B. kontaminierte Reinigungsmaterialien, Filter, Konzentrate, ausgebaute, nicht mehr verwendbare Komponententeile, werden in diesem Gebäude konditioniert und für eine spätere Endlagerung zwischengelagert.

- Notspeisegebäude

Das Gebäude enthält das 4fach redundante Notspeisesystem, eine Notsteuerstelle für den Reaktor sowie besonders gesicherte Teile des redundanten Reaktorschutzsystems. Das Notspeisesystem dient der sekundärseitigen Notspeisung der Dampferzeuger bei Ausfall der normalen Speisewasserversorgung.

Die in diesem Gebäude befindlichen Anlagenteile dienen einmal der Beherrschung systemeigener Störfälle des Speisewasserdampfkreislaufes, zum anderen aber insbesondere der Beherrschung von Einwirkungen von außen auf das Kernkraftwerk während des Leistungsbetriebes, bei denen eine Beeinträchtigung der Anlagenteile im Schaltanlagengebäude oder Maschinenhaus möglich ist.

- Notstromdieselgebäude

In diesem Gebäude befinden sich die 4 redundanten Notstromdieselaggregate und die zugehörigen Betriebsstoffvorratsbehälter. Das Notstromsystem dient der Stromversorgung sicherheitstechnisch wichtiger Anlagenteile bei Ausfall der Eigenbedarfsversorgung (Ausfall Generator und Netzeinspeisung).

- Nebenkühlwasserpumpenbauwerk

Die in diesem Gebäude befindlichen Kühlwasserpumpen des sogenannten gesicherten Nebenkühlwassersystems (4fach redundant) dienen der Wärmeabfuhr aus den nuklearen Hilfsanlagen, dem Not- und Nachkühlsystem, den Notstromdieselanlagen und den Kaltwasseraggregaten.

Daneben gibt es auch weitere Pumpen des sogenannten "konventionellen Nebenkühlwassersystems", das sonstige Kühlstellen ohne sicherheitstechnische Bedeutung mit Kühlwasser versorgt.

## 5.2.2 Brandschutz

Auch in einem Kernkraftwerk lassen sich Brände nicht von vornherein ausschließen. Sowohl brennbare Materialien, z.B. Schmieröle oder Kabelisolierungen, als auch potentielle Zündursachen sind vorhanden. Im Vergleich zu anderen industriellen Anlagen sind die Mengen vorhandener Brandgüter - bis auf wenige Ausnahmen - aber gering.

Die Brandschutzmaßnahmen gliedern sich in bauliche und betriebliche Brandschutzmaßnahmen<sup>1)</sup>. Zu den ersteren gehören sowohl bautechnische als auch anlagentechnische Maßnahmen.

### ● Bauliche Brandschutzmaßnahmen

Die bautechnischen Brandschutzmaßnahmen haben insbesondere das Ziel, die Brandlasten gering zu halten und die Ausbreitung eines Brandes zu verhindern. Die einzelnen baulichen Anlagen des Kernkraftwerkes werden durch ausreichende Abstände oder durch ausreichende feuerwiderstandsfähige Bauteile voneinander getrennt. Innerhalb der baulichen Anlagen werden Brandabschnitte gebildet. Die Brandabschnittsgrößen genügen weitgehend vorgeschriebenen Regelungen, z.B. der Landesbauordnung, wobei im Einzelfall aus systemtechnischen Erfordernissen Abweichungen vorliegen. Innerhalb von Brandabschnitten gelegene Räume mit erhöhter Brandlast oder erhöhtem Schutzbedürfnis werden ausreichend feuerwiderstandsfähig gegen die umliegenden Räume abgeschottet. Das Brandschutzkonzept berücksichtigt dabei den redundanten Aufbau der Sicherheitseinrichtungen im Kernkraftwerk und trennt diese weitgehend räumlich oder durch mindestens feuerbeständige Bauteile. Bei der Aufteilung der Bauwerke in Brandabschnitte und ausreichend feuerwiderstandsfähig

---

<sup>1)</sup> Begriffsbestimmungen nach KTA Regel 2101.1 "Grundsätze des Brandschutzes" /KTA 84/

abgetrennte Bereiche werden Rettungswege zum Schutz des Betriebspersonals vorgesehen. An die sogenannten "gesicherten Rettungswege", das sind im Sinne der Landesbauordnung insbesondere notwendige Treppenträume und notwendige Flure, werden dabei besondere Anforderungen gestellt.

Zu den anlagentechnischen Maßnahmen gehören vorbeugende Maßnahmen an maschinentechnischen oder elektrischen Einrichtungen zur Reduzierung der Brandgefahr, automatische Brandmeldeanlagen in allen Bereichen mit sicherheitstechnisch wichtigen Systemen, Feuerlöschanlagen und Systeme zur Löschwasserversorgung. Die Meldungen einzelner Meldelinien von Brandmeldern werden in einer Brandmeldezentrale angezeigt. In der Warte erfolgt eine optische und akustische Sammelmeldung. Ortsfeste Löschanlagen sind grundsätzlich überall dort eingebaut, wo größere Brandlasten vorhanden und die Möglichkeiten der manuellen Brandbekämpfung durch unzureichende Rauch- und Wärmeabfuhr oder erschwerte Zugänglichkeit eingeschränkt sind. Löschanlagen befinden sich z.B. innerhalb des Sicherheitsbehälters im Bereich der Hauptkühlmittelpumpen, in den Ölbehälterräumen (Schmieröl für die Hauptkühlmittelpumpen) und im Bereich der Kabelverteilungen wegen der vorhandenen Kabelmassierung. Die ortsfesten Löschanlagen werden im allgemeinen manuell ausgelöst. Das Konzept zur Brandbekämpfung sieht die Auslösung von Löschanlagen grundsätzlich erst dann vor, nachdem sich das Betriebspersonal vor Ort über den Brand informiert hat. Zum Löschwassersystem gehört eine Löschwasser-Ringleitung mit Überflurhydranten auf dem Gelände in der Nähe von Gebäudeeingängen und Hydranten mit nassen Steigleitungen.

Zu den baulichen Brandschutzmaßnahmen zählen auch spezielle Maßnahmen zur Rauch- und Wärmeabfuhr sowie zum Brandschutz bei Lüftungsanlagen. Die Maßnahmen ergeben sich durch eine weitgehend geschlossene, fensterlose Bauweise der Gebäude und die Notwendigkeit zur Zwangsbelüftung.

Aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten, insbesondere aus Strahlenschutzgründen, ist eine großvolumige Rauchabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter des Reaktorgebäudes nicht möglich. In den Räumen des Schaltanlagegebäudes, in denen sich größere Kabelmassierungen befinden, sind maschinelle Anlagen zur Rauchabfuhr vorhanden. Der Brandschutz bei Lüftungsanlagen verfolgt mehrere Ziele. Zunächst gilt es, eine Brandausbreitung über Lüftungskanäle, die durch brandschutztechnische

Abtrennungen führen, durch Einbau von Brandschutzklappen oder feuerbeständige Auslegung der Kanäle zu verhindern. Darüber hinaus muß für bestimmte Raumbereiche die Lüftungstechnische Versorgung bei einem Brand in benachbarten Brandabschnitten sichergestellt sein. Weiterhin werden spezielle Maßnahmen getroffen, um Filtereinrichtungen, insbesondere Aktivkohlefilter, zu schützen.

#### ● Betriebliche Brandschutzmaßnahmen

Jedes Kernkraftwerk sollte über eine betriebliche Feuerwehr verfügen, soweit die öffentlich rechtliche Feuerwehr personell und sachlich nicht entsprechend ausgerüstet ist, den Besonderheiten bei Kernkraftwerken nicht Rechnung tragen kann und nicht rechtzeitig einsatzbereit ist. Bei der Referenzanlage ist eine betriebliche Feuerwehr vorhanden. Für die Ausrüstung, Mannschaftsstärke und Ausbildung der betrieblichen Feuerwehr gibt es in den einzelnen Bundesländern unterschiedliche, den Gegebenheiten im Kernkraftwerk angepaßte Regelungen.

Die Maßnahmen zur Brandverhütung und -bekämpfung sowie das Verhalten im Brandfall sind in einer Brandschutzordnung geregelt. Diese ist Teil des Betriebshandbuches.

#### 5.3 Auswahl der zu untersuchenden Raumbereiche

Die Brandgefahrenanalyse baut auf einer raumweisen Untersuchung von Brandereignissen in den genannten Gebäuden (siehe Abschnitt 5.2) auf, wobei die Möglichkeit der Brandausbreitung in benachbarte Räume berücksichtigt wird. Zur Verminderung des Analyseaufwandes mußte die Anzahl der zu untersuchenden Räume oder Raumbereiche soweit wie möglich beschränkt werden.

Im ersten Schritt wurden dazu alle Raumbereiche mit ihren sicherheitstechnischen und brandspezifischen Merkmalen zusammengestellt.

Im zweiten Schritt wurden dann anhand der Auswahlkriterien

- große Brandlast,
- Vorhandensein von Zündquellen,

- Vorhandensein von sicherheitstechnisch wichtigen Systemen und Anlagenteilen,
- Vorhandensein von radioaktivem Inventar

diejenigen Räume ausgewählt, bei denen drei der vier Kriterien erfüllt waren. Zusätzlich wurden auch Nachbarräume mit berücksichtigt, wenn sie nur große Brandlasten enthielten. Die Ergebnisse dieses qualitativen Auswahlverfahrens wurden mit einer in der amerikanischen Literatur /SAN 79/ beschriebenen "critical path analysis" und den dort angegebenen Einflußgrößen quantitativ überprüft. Es stellten sich die gleichen Räume als analysenswert heraus.

Im dritten und letzten Schritt wurden dann aus den ausgewählten Räumen diejenigen bestimmt, die als repräsentativ für alle Räume mit vergleichbaren Brandereignissen und Gefährdungsmöglichkeiten angesehen werden konnten. Auf diese Weise ergaben sich die in Tabelle 5.3/1 aufgeführten Räume, für die eine detaillierte Analyse durchgeführt wurde.

Tab. 5.3/1:

Ausgewählte Raumbereiche für die Untersuchung brandspezifischer Ereignisabläufe

Ausgewählte Bereiche	Kontrollbereich
(A) Ölbehälterraum im Sicherheitsbehälter	x
(B) Bereich der Hauptkühlmittelpumpen	x
(C) Bereiche der Kabeldurchführungen im Sicherheitsbehälter	x
(D) Kabelschacht mit angrenzendem Flutbehälterraum	x
(E1) Kabelverteilung im Ringraum (+16 m)	x
(E2) Kabelverteilung im Ringraum (+ 9 m)	x
(F) Bereich Feststoffpresse/Lager für radioaktive Abfälle	x
(G) Kabelraum unterhalb der Warte	-
(H) Ölbehälterraum im Notstromdieselgebäude	-
(I) Rohr- und Kabelkanal zwischen Reaktorgebäude und Notspeisegebäude	-

#### 5.4 Brandspezifische Ereignisabläufe und ihre Bedeutung für die Sicherheit des Kernkraftwerkes

Im folgenden werden raumweise die wesentlichen Gesichtspunkte brandspezifischer Ereignisabläufe für die in Tabelle 5.3/1 genannten Raumbereiche erläutert. Die Vorgehensweise richtet sich nach den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Methoden. Deshalb werden methodische Gesichtspunkte hier nicht behandelt. Die einzelnen Ereignisablaufdiagramme sowohl für die vereinfachte als auch für die detaillierte Analyse sind raumbereichsweise im Fachband 3, Abschnitt 3 dargestellt. Dort werden auch die Randbedingungen der Brandszenarien und die einzelnen Ereignisablaufpfade im Detail beschrieben.

Die Bedeutung der Auswirkungen eines Brandes auf die Sicherheit des Kernkraftwerkes wird in dieser Studie danach beurteilt, ob sicherheitstechnisch wichtige Systeme und Anlagenteile im betroffenen Raumbereich oder in angrenzenden Räumen infolge der Brandwirkungen ausfallen oder ob eine brandbedingte direkte Freisetzung von radioaktiven Stoffen durch den Brand erfolgen kann.

Zu den sicherheitstechnisch wichtigen Systemen und Anlagenteilen zählen insbesondere die Einrichtungen des Sicherheitssystems, die zur Abschaltung des Reaktors, zur Erhaltung der langfristigen Unterkritikalität, zur Nachwärmeabfuhr oder zur Rückhaltung von Aktivität (Einhaltung der Störfallplanungswerte gemäß § 28 Abs. 3 der Strahlenschutzverordnung) dienen. Als Sicherheitssystem werden die gesamten Einrichtungen einer Reaktoranlage bezeichnet, die die Aufgabe haben, die Anlage vor unzulässigen Beanspruchungen zu schützen und bei auftretenden Störfällen deren Auswirkungen auf das Betriebspersonal, auf die Anlage und die Umgebung in vorgegebenen Grenzen zu halten. Ergänzend werden die Ausfälle von Betriebssystemen berücksichtigt, sofern diese auch eine sicherheitstechnische Bedeutung haben (z.B. Einrichtungen der Warte) oder Störfälle auslösen könnten.

Von besonderer Bedeutung sind diejenigen Ereignisabläufe, die zum Ausfall von mehr als einer Redundanz einer redundanten Einrichtung des Sicherheitssystems führen. Für die Ausfälle von Komponenten und Systemen wurden Ausfallkriterien, in der Regel Versagenstemperaturen, in Anlehnung an allgemein geltende Spezifikationen im Genehmigungsverfahren definiert (siehe Fachband 3, Abschnitt 3.1.4).

- Ölbehälterraum im Sicherheitsbehälter (A)

Es wird ein Brand von Leckageöl in einem Ölbehälterraum im Sicherheitsbehälter untersucht. Dabei werden die Auswirkungen auf den benachbarten Armaturenraum und eine mögliche Brandausbreitung über einen angrenzenden Treppenraum auf eine Kabelverteilung betrachtet. Die Brandschutztüren zu diesen Räumen sind mit im Brandfall automatisch auslösenden Feststellanlagen ausgerüstet. Die Brandbekämpfung kann manuell oder mittels einer stationären Sprühwasserlöschanlage erfolgen.

Ein brandbedingter Ausfall von Komponenten im betrachteten Armaturenraum macht zwar das Abschalten des Reaktors und das Abfahren des Kernkraftwerkes erforderlich, führt aber zu keinem Ausfall von Einrichtungen des Sicherheitssystems. Dagegen führt eine Brandausbreitung auf die Kabelverteilung zu einem Ausfall von Kabeln (Leittechnik, Energieversorgung) einer Redundanz vierfachredundanter Einrichtungen, wovon auch das Sicherheitssystem betroffen ist.

- Bereich der Hauptkühlmittelpumpen (B)

Es wird ein Ölbrand im Bereich der Ölversorgung einer Hauptkühlmittelpumpe unterstellt. Aufgrund des hohen Strahlenpegels in diesem Raumbereich wird für die Brandbekämpfung nur die vorhandene stationäre Sprühwasserlöschanlage berücksichtigt.

Für die Verbrennung des Leckageöls steht zunächst nur das Luftvolumen des Anlagenraumes zur Verfügung. Kommt es aufgrund des brandbedingten Druckanstieges in diesem Raum zu einem Öffnen der Dampferzeugerüberströmdecken (das sind verschlossene Öffnungen, die zum Druckausgleich beim Kühlmittelverluststörfall bei Erreichen bestimmter Differenzdrücke selbsttätig öffnen), so nimmt auch das übrige Luftvolumen des Sicherheitsbehälters am Verbrennungsprozeß teil.

Ein Ausfall mehrerer Hauptkühlmittelpumpen führt zur Abschaltung des Reaktors und zur Anforderung von Einrichtungen des Sicherheitssystems, die aber vom Brand selbst nicht betroffen sind. Von weiterer Bedeutung ist die Frage, ob Ausfälle sonstiger Einrichtungen, insbesondere Meß- und Überwachungseinrichtungen, im Anlagenraum eintreten können oder im übrigen Bereich des Sicherheitsbehälters möglich sind.

- Bereiche der Kabeldurchführungen im Sicherheitsbehälter (C)

Die Kabeltrassen (Energieversorgung, Leittechnik) im betrachteten Bereich sind den 4fach redundanten Einrichtungen so zugeordnet, daß bei den Kabeln eine räumliche Trennung der Redundanzen gegeben ist. Zwischen diesen räumlich getrennten Kabelverteilungen verlaufen nichtredundante, sicherheitstechnisch weniger wichtige Kabel der sogenannten Nullredundanz, die zur Verhinderung eines Brandübertrages mit Dämmschichtbildner versehen sind. Die Brandbekämpfung kann mittels stationärer Sprühwasserlöschanlage und manuell erfolgen.

Ausgehend von einem Brand in einer Kabelverteilung sind die Ereignisablaufpfade von Bedeutung, bei denen es zu Ausfällen von Kabeln mehrerer Redundanzen kommt. Dabei würden Einrichtungen des Sicherheitssystems angefordert, deren Kabelverbindungen teilweise vom Brand betroffen wären. Solche Ausfälle sind möglich, wenn sich über die Kabel der

Nullredundanz ein Brand in die benachbarte Kabelverteilung ausbreitet oder wenn die Raumtemperatur dort die Versagenstemperatur der Kabel erreicht.

- Kabelschacht mit angrenzendem Flutbehälterraum (D)

Ausgehend von einem Brand in einem Kabelschacht wird die mögliche Brandübertragung auf andere Kabelführungen im Reaktorgebäuderingraum betrachtet. Die Brandbekämpfung erfolgt hier manuell. Bei einem Brand im Schacht und Brandausbreitung auf eine Kabelführung im angrenzenden Flutbehälterraum fallen zwei Kabelredundanzen von Kabelverbindungen zwischen Reaktorgebäude und Notspeisegebäude aus. Untersucht wird weiterhin die Möglichkeit des Versagens eines Kabelschotts am oberen Ende des Schachtes, sowie der damit verbundene Ausfall einer weiteren Kabeltrasse im Reaktorgebäuderingraum. Von Bedeutung ist der gleichzeitige brandbedingte Ausfall dieser Kabel, da hierbei Einrichtungen des Sicherheitssystems angefordert würden und Kabelverbindungen dieser Einrichtungen teilweise vom Brand selbst betroffen wären.

- Kabelverteilungen im Ringraum (E1, E2)

Untersucht werden Brände in der Kabelverteilung auf der 16-m-Ebene bzw. auf der 9-m-Ebene hinsichtlich der Frage, ob mehr als eine Kabelredundanz vom Brand betroffen ist. Die räumlich getrennte Anordnung der Kabel auf der 16-m-Ebene ist vergleichbar mit den vorher beschriebenen Gegebenheiten der Kabeldurchführungen im Sicherheitsbehälter. Auf der 9-m-Ebene kommen zusätzlich bauliche Abtrennungen zwischen den Kabelredundanzen zum Tragen. Die Brandbekämpfung erfolgt manuell.

Der Ausfall von mehr als einer Kabelredundanz führt zur Anforderung von Einrichtungen des Sicherheitssystems, wobei auch Kabelverbindungen dieser Einrichtungen teilweise vom Brand selbst betroffen sind.

Zusätzlich wird geprüft, ob aufgrund der untersuchten Brandfälle im gesamten Ringraum Temperaturen (mittlere Raumtemperaturen) auftreten können, bei denen auch in vom Brand nicht betroffenen Bereichen elektrotechnische Einrichtungen ausfallen.

● Bereich Feststoffpresse/Lager für radioaktive Abfälle (F)

Die brandspezifische Ereignisablaufanalyse dient der Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für eine brandbedingte Freisetzung radioaktiver Stoffe im Reaktorhilfsanlagengebäude. Im betrachtenden Bereich lagern zur Konditionierung vorgesehene offene, brennbare, kontaminierte Abfälle und umschlossene, verpreßte Abfälle in Gebinden (200 l Rollreifenfässer). Im Reaktorhilfsanlagengebäude ist eine manuelle Brandbekämpfung vorgesehen.

Im Brandfall sind zunächst nur die im Brandraum lagernden offenen radioaktiven Abfälle betroffen. Bei Erreichen angenommener Versagertemperaturen (siehe Fachband 3, Abschnitt 3.8.1) muß auch von einer Freisetzung aus bereits verpreßten und umschlossenen Abfällen in den Gebinden ausgegangen werden. Rechnungen zur Größe der Freisetzung radioaktiver Stoffe (Aktivität, betroffene Nuklide) und radiologische Rechnungen zum Ausbreitungsverhalten wurden nicht durchgeführt.

● Kabelraum unterhalb der Warte (G)

Alle wesentlichen Kabelverbindungen von Anzeige- und Betätigungsfeldern der Warte führen durch den betrachteten Raum. Ein brandbedingter Ausfall dieser Kabelverbindungen ist deshalb gleichbedeutend mit dem Ausfall der Warte. Obwohl die Funktion der Warte von sicherheitstechnisch wichtiger Bedeutung ist und bei ihrem Ausfall die Betriebssysteme entweder ausfallen oder in undefinierte Betriebszustände gelangen können, bedeutet der Ausfall der Warte nicht, daß die Anlage in einen unsicheren Zustand gerät. Vielmehr treten Einrichtungen des Sicherheitssystems in Funktion, welche die erforderlichen Sicherheitsaktionen durch Stellsignale unmittelbar aus Schaltschränken in brandschutztechnisch getrennten Raumbereichen automatisch auslösen und die Anlage autark mindestens 10 Stunden in einem sicheren Zustand halten, bis das Personal von der Notsteuerstelle im Notspeisegebäude aus die Anlage abfährt.

Die Brandbekämpfung im betrachteten Bereich erfolgt manuell. Von Bedeutung ist, ob es ausgehend von einem Brand im Unterwartenraum, zu einer Brandausbreitung auf brandschutztechnisch getrennte Nachbarräume

kommen kann. Da in diesem Fall auch Teile von Einrichtungen des angeforderten Sicherheitssystems betroffen sein können, wird er näher untersucht.

- Ölbehälterraum im Notstromdieselgebäude (H)

Es wird eine Leckage und Zündung von Dieselöl aus einem Ölvorratsbehälter unterstellt und untersucht, ob es infolge dieses Leckageölbrandes zu einem Sieden des Dieselöls im Vorratsbehälter kommt. In diesem Fall wird ein Versagen des Behälters mit Abbrand des gesamten Inhaltes angenommen. Die Brandwirkungen, die dabei auftreten, führen zu einem Versagen von Brandabschnittsbegrenzungen (siehe Fachband 3, Abschnitt 3.10.3) und damit zu einer Brandausbreitung auf benachbarte redundante Notstromdieselaggregate und Ölvorratsbehälter. Zur Brandbekämpfung sind stationäre Sprühwasserlöschanlagen vorhanden.

Hinsichtlich der sicherheitstechnischen Bedeutung eines Großbrandes im Notstromdieselgebäude, bei dem alle Notstromaggregate ausfallen, ist anzumerken, daß ein solcher Brand nicht zur Anforderung des Notstromsystems führt. Bei der Ermittlung der brandbedingten Ausfallhäufigkeit des Notstromsystems ist deshalb nur der Fall von sicherheitstechnischer Bedeutung, bei dem es, unabhängig von dem Brand, gleichzeitig zu einem Netzausfall mit Störung der Eigenbedarfsversorgung über den Generator kommt.

- Rohr- und Kabelkanal zwischen Reaktorgebäude und Notspeisegebäude (I)

Die Kabel und Rohrleitungen zwischen diesen Gebäuden verlaufen in 4 nebeneinanderliegenden, aber brandschutztechnisch getrennten, unterirdischen, begehbaren Kanälen. Sie sind jeweils einer bestimmten Redundanz von Einrichtungen des Sicherheitssystems zugeordnet. In den Kanälen sind stationäre Sprühwasserlöschanlagen vorhanden. Ausgehend von einem Kabelbrand in einem Kanal wird untersucht, ob es zu einer Brandausbreitung (über eine Brandschutztür) auf einen benachbarten Kanal kommen kann.

Bei einem Ausfall von Kabeln in zwei Kanälen kann es zu Fehlfunktionen in Teilen des Sicherheitssystems kommen, die zur Abschaltung des Reaktors führen und das Abfahren der Anlage erfordern.

### 5.5 Brandeintrittshäufigkeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten von Brandschutzmaßnahmen

Die zugrundegelegten Daten der Ereignisabläufe für die im Abschnitt 5.4 genannten Räume oder Raumbereiche sind in Fachband 3, Abschnitt 3.2 raumweise dokumentiert und kommentiert. Die Tabelle 5.5/1 zeigt eine Zusammenstellung der zugrundegelegten Brandeintrittshäufigkeiten sowie der in den abgekürzten Rechnungen (siehe Abschnitt 3.7.1) verwendeten Werte zur Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandmeldung und Brandbekämpfung in den untersuchten Räumen. Die in den detaillierten Rechnungen verwendeten Ausfallwahrscheinlichkeiten weichen im Prinzip nicht von

Tab. 5.5/1:

Brandeintrittshäufigkeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten der aktiven Brandschutzmaßnahmen für die untersuchten Räume oder Raumbereiche

Brandraum bzw. Brandbereich	Brandeintrittshäufigkeit [1/a]	Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung			
		Brandmeldung		Brandbekämpfung	
		direkt	indirekt	direkt	indirekt
Ölbehälterraum (A)	4,4 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	3,3 E-1	1,0
Bereich der Hauptkühlmittelpumpen (B)	4,4 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	5,0 E-1	5,0 E-1
Bereich der Kabeldurchführung +12 m (C)	1,2 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	4,4 E-1	2,7 E-1
Kabelschacht mit angrenzendem Flutbehälterraum (D)					
• Kabelschott	1,2 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	1,0	1,0
• Flutbehälterraum	1,2 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	1,0	1,0
Kabelverteilung im Ringraum +16 m (E1)	1,2 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	9,5 E-1	5,0 E-1
Kabelverteilung im Ringraum +9 m (E2)	1,2 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	9,5 E-1	5,0 E-1
Bereich Feststoffpresse (F)	6,0 E-2	3,9 E-2	4,0 E-3	1,0 E-1	5,0 E-1
Kabelraum unterhalb der Warte (G)	1,2 E-2	6,3 E-2	2,4 E-3	1,0 E-1 <sup>1)</sup>	5,0 E-1
Dieselölbehälterraum (H)	1,0 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	5,3 E-1	2,7 E-1
Rohr- und Kabelkanal (I)	1,2 E-3	7,9 E-2	6,0 E-2	5,3 E-1	2,7 E-1

<sup>1)</sup> Ausfall RWA: 5,0 E-1

den in Tabelle 5.5/1 genannten Werten ab, da von gleichen statistisch ermittelten Daten (siehe Abschnitt 3.5) ausgegangen wird; allerdings werden brandbedingte Ausfälle bei diesen Rechnungen mitberücksichtigt.

Hinsichtlich der Ausfallwahrscheinlichkeiten passiver Brandschutzeinrichtungen interessieren vornehmlich die relativen Schwachstellen in raumabschließenden oder redundanztrennenden Bauteilen, also Türen, Kabelschotts und gegebenenfalls Brandschutzklappen. Wie im Abschnitt 3.6 dargestellt wurde, wird zur Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeiten dieser Einrichtungen der berechnete Brandraumtemperaturverlauf herangezogen. Aufgrund dieser Vorgehensweise ergeben sich für die einzelnen Räume und die dort jeweils untersuchten brandspezifischen Ereignisabläufe unterschiedliche Werte für die Ausfallwahrscheinlichkeit der passiven Brandschutzeinrichtungen (siehe Fachband 3, Abschnitt 3.2).

## 5.6 Ermittlung der Brandwirkung

Für die zu untersuchenden Räume oder Raumbereiche wurde als wesentliche Brandwirkung die Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Branddauer nach der Wärmebilanztheorie (siehe Abschnitt 3.3) berechnet. Im Einzelfall wurden darüber hinaus auch Bauteiltemperaturen (Raumbereiche B, C: Temperatur des Sicherheitsbehälters), Komponententemperaturen (Raum H: Öltemperatur im Vorratsbehälter) oder Rauchgasmengen und Druckerhöhungen (Raumbereich B) ermittelt.

Aufgrund der unterschiedlichen brandbeeinflussenden Randbedingungen in den einzelnen betrachteten Ereignisablaufpfaden sind in der Regel verschiedene Temperaturzeitverläufe zu unterscheiden. In Bild 5.6/1 sind exemplarisch die ermittelten Raumtemperaturzeitverläufe für mögliche Brandverläufe im Raumbereich F "Feststoffpresse/Lager für radioaktive Abfälle" dargestellt (vgl. Abschnitt 3.7.2).

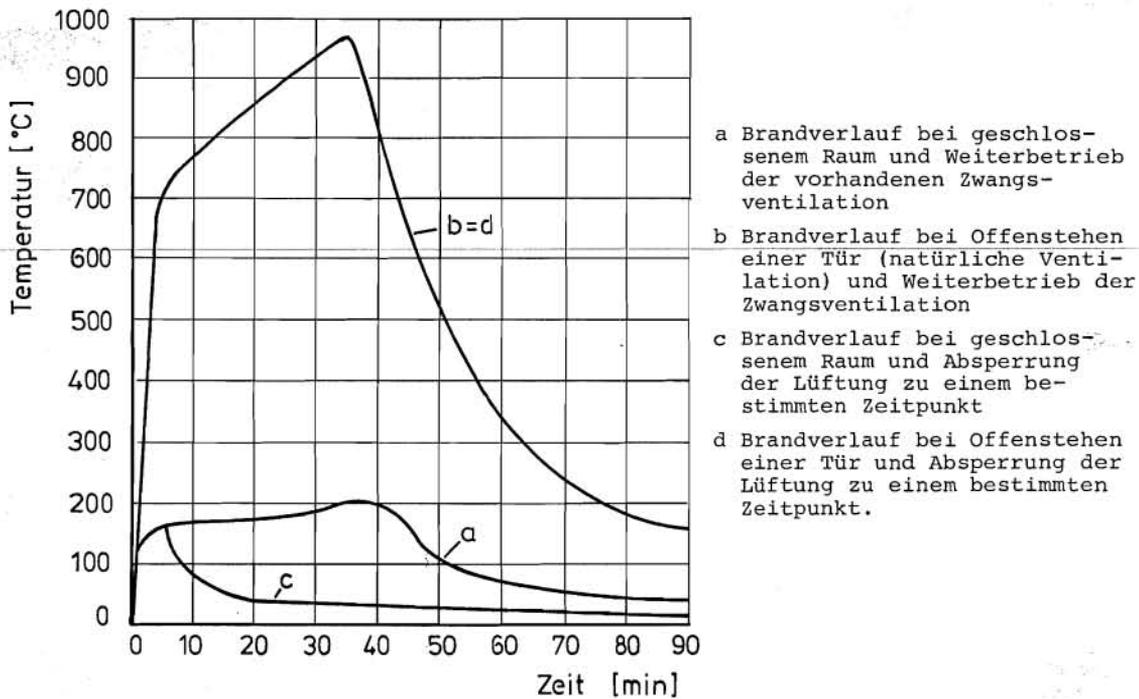


Bild 5.6/1:

Raumtemperaturverläufe für mögliche Brandverläufe im Raumbereich F

Hiervon kann der Brandverlauf (a) als normaler, von aktiven Maßnahmen unbeeinflusster Brand angesehen werden. Der Brandverlauf (b) tritt relativ selten auf, da hierzu eine Tür des Brandraumes offengehalten sein muß (entweder durch Keil oder Nichtauslösen einer Feststellanlage oder wie im vorliegenden Fall des Raumbereiches F möglicherweise durch Betriebspersonal oder Feuerwehr zur manuellen Brandbekämpfung); dieser Brand verläuft jedoch heftiger als Brand (a) und kann daher zu kritischen Folgen führen. Der Brandverlauf (c) kommt dann zustande, wenn bei Brand (a) nach einer bestimmten Zeit die Zwangsventilation unterbrochen wird, indem entweder die Brandschutzklappen in Abluft und/oder Zuluft durch Schmelzlot oder von Hand geschlossen werden oder aber die Lüftung von der Warte abgestellt wird. Durch diese Maßnahme werden die Brandraumtemperaturen in der Regel auf unkritische Werte gesenkt. Der Brandverlauf (d) entspricht im allgemeinen in etwa dem Verlauf (b) - im vorliegenden Fall gilt (b) = (d) -, da bei natürlicher Ventilation durch offenstehende Türen die Unterbrechung der Zwangsventilation kaum einen Einfluß hat.

Prinzipiell sind noch zwei weitere, in Bild 5.6/1 nicht dargestellte Brandverläufe zu berücksichtigen:

- (e) Brandverlauf bei geschlossenem Raum, Weiterbetrieb der Zwangsventilation und Beginn der Brandbekämpfung zu einem bestimmten Zeitpunkt,
- (f) Brandverlauf bei Offenstehen einer Tür, Weiterbetrieb der Zwangsventilation und Beginn der Brandbekämpfung zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Bei diesen Brandverläufen dienen die Verläufe (a) und (b) als Ausgangsbasis. Am Beispiel der Brandräume G und H wurde die Wirkung der Brandbekämpfung mit stationären Löschanlagen auf die Brandraumtemperatur untersucht. Es zeigte sich, daß die Brandraumtemperatur nach Einsatz der Brandbekämpfung sehr rasch auf relativ unbedeutende Werte abfiel.

Die berechneten Temperaturverläufe wurden für alle untersuchten Räume graphisch dargestellt (siehe Fachband 3, Abschnitt 3). Bei allen Temperatur-Zeit-Verläufen ist die "pre-flash-over"-Phase praktisch unterdrückt. Es wurde also konservativ eine ausreichend starke Zündenergie vorausgesetzt, bei der sich sehr rasch ein Vollbrand entwickelt. Strömungsbedingte Besonderheiten im Brandraum, die lokal zu ungünstigen oder auch günstigeren Verhältnissen führen können, werden nicht berücksichtigt. Die angegebenen Temperaturen stellen somit Mittelwerte über den betrachteten Raumbereich dar.

Zur Beurteilung von Auswirkungen auf Komponenten und Systeme wurde innerhalb des vom Brand betroffenen Raumbereichs eine Temperaturbeanspruchung entsprechend der ermittelten Raumtemperatur angenommen. Bei Komponenten und Systemen in Nachbarbereichen tritt nach Versagen des Raumabschlusses im Brandraum eine gegenüber der Brandraumtemperatur um eine raumspezifische (zeitlich konstant angenommene) Temperaturdifferenz reduzierte Temperaturbeanspruchung auf; für die Brandfortleitung in die Nachbarbereiche wurde in diesen Fällen eine Zeitverzögerung geschätzt.

Nachfolgend werden für zwei untersuchte Raumbereiche die Temperaturzeitverläufe vertieft diskutiert: Zunächst für einen Ölbrand im Be-

reich der Hauptkühlmittelpumpen (Raumbereich B) aufgrund der unter Brandschutzexperten bis heute kontrovers geführten Diskussionen über die möglichen Wirkungen eines solchen Brandes. Danach werden die Brandverläufe in einer Kabelverteilung im Ringraum (Raum E2) gezeigt. Dieses Brandereignis wird in den nachfolgenden Abschnitten dafür verwendet, beispielhaft zu zeigen, wie die Quantifizierung der brandspezifischen Ereignisabläufe erfolgt und wie die Ergebnisse der Brandgefahrenanalyse dargestellt werden.

● Bereich der Hauptkühlmittelpumpen (B)

Bild 5.6/2 zeigt die Raumtemperatur- und Druckzeitverläufe bei einem von Brandschutzmaßnahmen unbeeinflussten Ölbrand an einer Hauptkühlmittelpumpe.

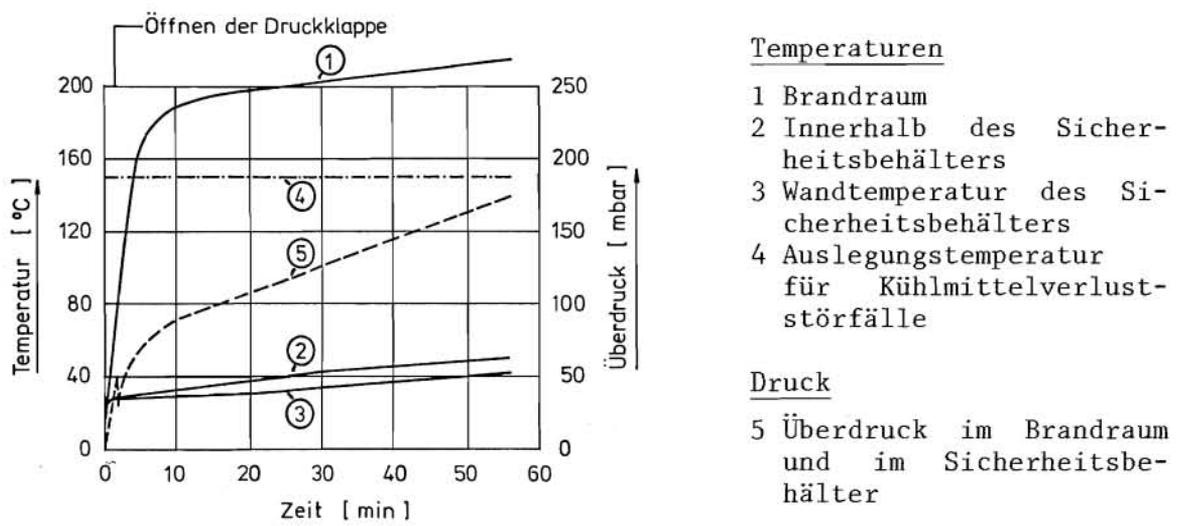


Bild 5.6/2:

Raumtemperatur- und Druckzeitverläufe bei einem Ölbrand an einer Hauptkühlmittelpumpe

Den Rechnungen liegt eine Brandlast von 1000 kg Leckageöl und eine Abbrandgeschwindigkeit von 0,3 kg/s zugrunde. Der Wärmefluß in die baulichen Strukturen, einschließlich Sicherheitsbehälter, wurde global mit Hilfe der geometrischen Daten erfaßt; eine Wärmespeicherung in Komponenten blieb unberücksichtigt.

Es zeigt sich, daß die Temperatur im Brandraum zwar schnell ansteigt, ein Wert von 200 °C (angenommene Versagenstemperatur für Kabel, siehe

Fachband 3, Abschnitt 3.1.4) im betrachteten Zeitraum aber nur wenig überschritten wird. Die Temperaturen im Sicherheitsbehälter und diejenigen der Stahlhülle erhöhen sich nur geringfügig auf unkritische Werte. Deutlich erkennbar ist der Druckabfall beim Öffnen der Dampferzeugerüberströmdecken.

Die gezeigten Rechenergebnisse gehen davon aus, daß nur eine Druckklappe ( $0,36 \text{ m}^2$  Öffnungsquerschnitt) geöffnet ist. Variationsrechnungen mit kleinerer Abbrandgeschwindigkeit ( $0,2 \text{ kg/s}$ ) und größeren Öffnungsquerschnitten (max.  $8 \text{ m}^2$ ) führen im niedrigsten Fall zu Brandraumtemperaturen von ca.  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  bei zwar etwas höheren, aber immer noch unkritischen Temperaturen im Sicherheitsbehälter.

Hinsichtlich einer Verqualmung des Sicherheitsbehälters lassen die Rechnungen erkennen, daß diese relativ schnell erfolgt. Im Fachband 2, Teil A, Kapitel 8 wird auf diesen Aspekt vertieft eingegangen.

● Kabelverteilung im Ringraum (E2)

Bild 5.6/3 zeigt die ermittelten Raumtemperaturzeitverläufe für den Raum E2.

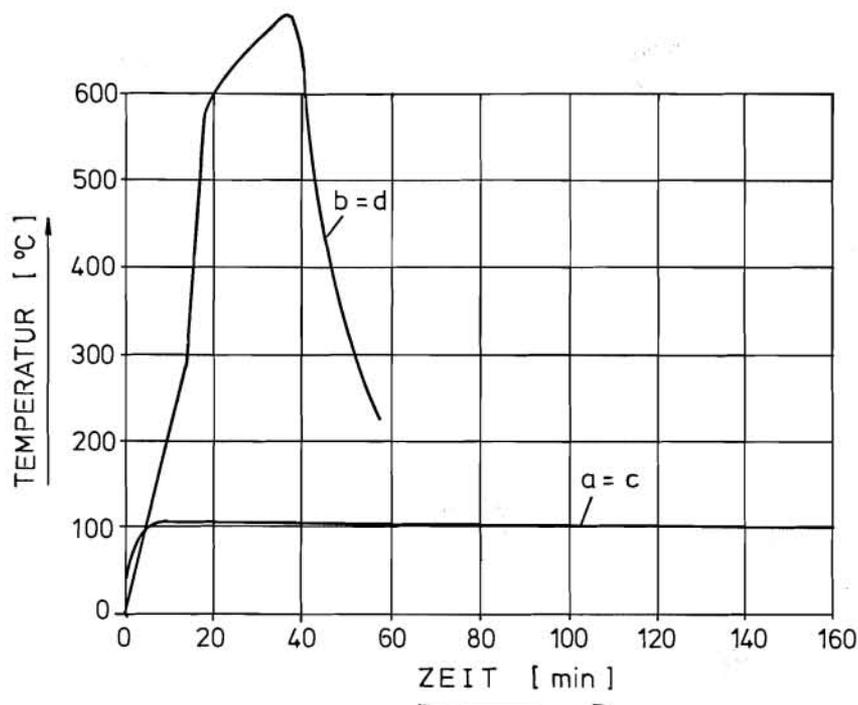


Bild 5.6/3:

Raumtemperaturzeitverläufe für den Raum E2

Im Fachband 3, Abschnitt 3 sind für jeden untersuchten Raum oder Raumbereich den graphischen Darstellungen der Temperaturzeitverläufe Tabellen zugeordnet, in denen die wichtigsten Kenndaten zur Ermittlung der Brandwirkungen erfaßt sind (siehe Tabelle 5.6/1 für den hier betrachteten Raumbereich E2):

Tab. 5.6/1:

Kenndaten zur Ermittlung der Brandwirkungen im Raumbereich E2

Kenndaten	Dimension	Menge/Größe
Brandlast (Menge, Heizwert)	kg kcal/kg	960, PVC auf horizontaler Trasse 5500
Abbrand (Abbrandgeschwindigkeit)	kg/s	a) 0,42 b) 0,42 c) = a) d) = b)
Wandmaterial	-	Beton
Grundfläche	m <sup>2</sup>	48,0
Volumen	m <sup>3</sup>	144,0
Oberfläche	m <sup>2</sup>	297,0
Ventilation	m <sup>2</sup> Öffnung bzw. kg/s	b) 4,0  a) 0,072
Wärmespeicherung	-	keine
Branddauer	min	a) > 120 min b) ca. 60 min
Temperaturverlauf	°C	siehe Diagramm
Sonstiges	-	Bei Überströmung der heißen Brandgase in den Ringraum ergeben sich bei ungünstigen Annahmen maximale Temperaturen von < 40 °C.

Es ist zu erkennen, daß die Unterschiede in den dargestellten Brandverläufen hier nur auf die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen zurückzuführen sind.

Ein wichtiges Ergebnis für die Brandgefahrenanalyse ist, daß bei Überströmen der Brandgase in den Reaktorgebäuderingraum dort nur maximale Temperaturen (über das freie Ringraumvolumen gemittelte Temperaturen) bis 40 °C auftreten. Berücksichtigt man zusätzlich noch, daß möglicherweise temperaturempfindliche Komponenten im wesentlichen in den unteren, vom Brand nicht unmittelbar betroffenen Ringraumbereichen angeordnet sind, so ist ein brandbedingter Ausfall dieser Komponenten bei Kabelbränden im Ringraum nicht zu erwarten.

## 5.7 Analyse von Brandereignisabläufen

Zu Vergleichszwecken wurden die brandspezifischen Ereignisablaufdiagramme sowohl mit einem abgekürzten (nach Abschnitt 3.7.1) als auch mit einem detaillierten Verfahren (nach Abschnitt 3.7.2) berechnet. Die Ereignisablaufdiagramme für diese beiden Berechnungsverfahren sind etwas unterschiedlich. Bei der abgekürzten Rechnung sind feste Ausfallwahrscheinlichkeiten für aktive und passive Maßnahmen anzunehmen, wobei die zeitliche Abfolge nur dann eine Rolle spielt, wenn spätere Maßnahmen vom Ergebnis der vorherigen abhängen. Die Einzelmaßnahmen wurden so vorgegeben, daß verfügbare statistische Daten zur Ausfallwahrscheinlichkeit unmittelbar eingesetzt werden konnten; hier war z.B. zu unterscheiden zwischen direkter Brandmeldung im betroffenen Raumbereich und indirekter aus Nachbarbereichen, für die unterschiedliche statistische Daten vorliegen.

Für die detaillierte Rechnung ist selbstverständlich die zeitliche Abfolge der Maßnahmen streng einzuhalten. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Maßnahmen ändert sich mit der Zeit und den Brandwirkungen. Damit ändert sich auch die Eintrittshäufigkeit bestimmter Konsequenzen mit der Zeit. Die Abfrage nach dem Eintreten dieser Konsequenz erfolgt stets am Ende der Ereignisabläufe: Es werden z.B. die Beeinträchtigung von Systemen und Komponenten im Brandraum, das Versagen der Brandraumumschließung mit Brandübertragung in einen Nachbarbereich und die Beeinträchtigung von Komponenten und Systemen in diesem Nachbarbereich zum gleichen Zeitpunkt  $t^*$  abgefragt.

Die Eingangsdaten für die Ereignisablaufanalysen wurden für die nach Abschnitt 5.3 ausgewählten Raumbereiche vorgegeben (siehe Fachband 3, Abschnitt 3). Zur Veranschaulichung werden nachfolgend jeweils die Eingangsdaten für die abgekürzte Rechnung (Tab. 5.7/1) und für die detaillierte Rechnung (Tab. 5.7/2) am Beispiel des Raumes E2 aufgezeigt.

Tab. 5.7/1:

Eingangsdaten der abgekürzten Rechnung für Brandraum E2 und Ausfall der Nachbarredundanz

Brandeintrittshäufigkeit pro Jahr	1,2 E-3
<b>Teilsystem</b>	<b>Ausfall- wahrscheinlichkeit pro Anforderung</b>
Brandmeldung (direkt)	7,9 E-2
Raumabschluß	8,0 E-2
Lüftungsabschluß:	
• Brandmeldung; Raumabschluß	6,4 E-2
• Brandmeldung; kein Raumabschluß	9,1 E-2
• keine Brandmeldung; Raumabschluß	0,64
• keine Brandmeldung; kein Raumabschluß	0,91
Brandbekämpfung (direkt)	0,95
Brandmeldung (indirekt)	6,0 E-2
Brandbekämpfung (indirekt):	
• direkte Brandmeldung	0,5
• indirekte Brandmeldung	0,5
Brandabschnittsbegrenzung:	
• Raumabschluß, Lüftungsabschluß	0,0
• Raumabschluß, kein Lüftungsabschluß	0,0
• kein Raumabschluß; Lüftungsabschluß	1,0
• kein Raumabschluß: kein Lüftungsabschluß	1,0
Schutz der Komponenten im Brandraum:	
• erfolgreiche direkte Brandbekämpfung	1,0
• Ausfall direkte Brandbekämpfung	1,0
Schutz der Komponenten im Nachbarraum:	
• Brandabschnittsbegrenzung intakt	0,0
• Brandabschnittsbegrenzung versagt	1,0

Tab. 5.7/2:

Eingangsdaten der Versagensmodelle der detaillierten Rechnung für Brandraum E2 und Ausfall der Nachbarredundanz

Brandeintrittshäufigkeit I = 1,200 E-03 1/a

Nr.	Name	Bedeutung	Ausfall- wahr- schein- lichkeit	Basisvariablen			
				Erwartungs- wert	Standard- abweichung	Typ	
1	P <sub>11</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für Personal vor Ort	1,000				
2	P <sub>12</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für automatische Meldung im Raum	0,079				
3	P <sub>13</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für Personal im Nachbarraum	0,500				
4	P <sub>14</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für automatische Meldung im Nachbarraum	0,200				
5	P <sub>15</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für Erkennen von Komponentenausfällen	0,600				
6	P <sub>21</sub>	Wahrscheinlichkeit für Offenstehen von Türen (Tür 1)	0,080				
7	P <sub>22</sub>	Wahrscheinlichkeit für Offenstehen von Türen (Tür 2)					
8	P <sub>23</sub>	-					
9	P <sub>32</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für Auslösung durch Brandläufer vor Ort	0,500				
10	P <sub>33</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für Handlung in der Warte					
11	P <sub>35</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit der Absperrvorrichtung					
12	P <sub>42</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für RWA-Auslösung durch Brandläufer vor Ort					
13	P <sub>43</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit für RWA-Umschaltung in der Warte					
14	P <sub>44</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit der RWA-Einrichtungen					
15	P <sub>54</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit der manuellen Löscheinrichtungen	0,100				
16	P <sub>56</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit der stationären Löscheinrichtungen	1,000				
17	P <sub>62</sub>	Ausfallwahrscheinlichkeit der Löscheinrichtung zur indirekten Brandbekämpfung	0,200				
18	$\theta_s$	Ansprechtemperatur der Schmelzlotsicherung		°C 120,000	6,000	GN	
19	$\Delta\theta_A$	Temperaturdifferenz zwischen Brandraum und Abluftkanal		°C 700,000	0,100	GN	
20	$\Delta\theta_Z$	Temperaturdifferenz zwischen Brandraum und Zuluftkanal		°C 75,000	7,500	GN	
21	$\Delta\theta_{KN}$	Temperaturdifferenz zwischen Brandraum und Nachbarkomponente		°C 150,000	30,000	GN	
22	$\theta_{RM}$	Versagenstemperatur der manuellen Brandbekämpfung		°C 700,000	70,000	GN	
23	$\theta_{RL}$	Versagenstemperatur der stationären Brandbekämpfung		°C 200,000	30,000	GN	
24	$\theta_{RK}$	Versagenstemperatur der Komponenten im Raum		°C 27400,000	7680,000	GN	
25	$\theta_{RKN}$	Versagenstemperatur der Komponenten im Nachbarraum		°C 100,000	30,000	GN	
26	$\int \theta dt$	Ertragbare "Wärmeenergie" der Brandraumbegrenzung		K-min 27400,000	7680,000	GN	
27	$\theta_{10}$	Anfangstemperatur des Temperaturzeitverlaufes 1 (a)*1		°C 100,000	30,000	GN	
28	a <sub>1</sub>	Steigung der Erwärmungsphase des Temperaturzeitverlaufes	1	-	0,010	0,000	GN
29	a <sub>A1</sub>	Amplitudenfaktor für Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes	1	-	1,000	0,001	GN
30	$\alpha_{A1}$	Exponent für Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes	1	-	0,500	0,000	LN
31	t <sub>A1</sub>	Zeitpunkt des Beginns der Abkühlung des Temperaturzeitverlaufes	1	min	200,000	1,000	LN
32	$\theta_{20}$	Anfangstemperatur des Temperaturzeitverlaufes 2 (b)		°C 500,000	80,000	GN	
33	$\alpha_2$	Steigung der Erwärmungsphase des Temperaturzeitverlaufes	2	-	5,000	0,250	GN
34	a <sub>A2</sub>	Amplitudenfaktor für Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes	2	-	0,950	0,095	GN
35	$\alpha_{A2}$	Exponent für Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes	2	-	0,900	0,090	LN
36	t <sub>A2</sub>	Zeitpunkt des Beginns der Abkühlung des Temperaturzeitverlaufes	2	min	40,000	5,000	LN
37	a <sub>A3</sub>	Amplitudenfaktor für Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes	3 (c)				
38	$\alpha_{A3}$	Exponent für Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes	3				
39	a <sub>A4</sub>	Amplitudenfaktor für Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes	4 (d)				
40	$\alpha_{A4}$	Exponent für Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes	4				
41	t <sub>1</sub>	Zeitverzug bis zur Meldung		min	3,000	3,000	LN
42	$\Delta t_3$	Zeitverzug bis zum Lüftungsabschluß		min	10,000	3,000	LN
43	$\Delta t_4$	Zeitverzug bis zur Inbetriebnahme der RWA					
44	$\Delta t_5$	Zeitverzug bis zum Löscheinsetzen vor Ort					
45	$\Delta t_{5*}$	Zeitbedarf für die erfolgreiche direkte Brandbekämpfung		min	10,000	3,000	LN
46	$\Delta t_{6*}$	Zeitbedarf bis zum Beginn der indirekten Brandbekämpfung		min	15,000	3,000	LN
47	$\Delta t_{6*}$	Zeitbedarf für die erfolgreiche indirekte Brandbekämpfung		min	10,000	2,000	LN
48	t <sub>w</sub>	Zeitverzug der Brandübertragung in Nachbarbereich		min	5,000	1,000	LN

\*1 siehe Bild 5.6/3: Raumtemperaturzeitverläufe für den Raum E2

GN = Gaußsche Normalverteilung  
LN = Logarithmische Normalverteilung

Die abgekürzten Rechnungen für diesen Raum erfolgen anhand des in FB 3, Abschnitt 3.7.1 beschriebenen Ereignisablaufdiagramms (FB 3, Bild 3.7/1). Den detaillierten Rechnungen für den Raum E2 liegt das in Bild 5.7/1 dargestellte Diagramm zugrunde.

Die in Tabelle 5.7/2 aufgeführten Variablen 1-17 stimmen - bis auf die brandbedingten Ausfälle - im wesentlichen mit den Eingangsdaten für die vereinfachte Rechnung überein.

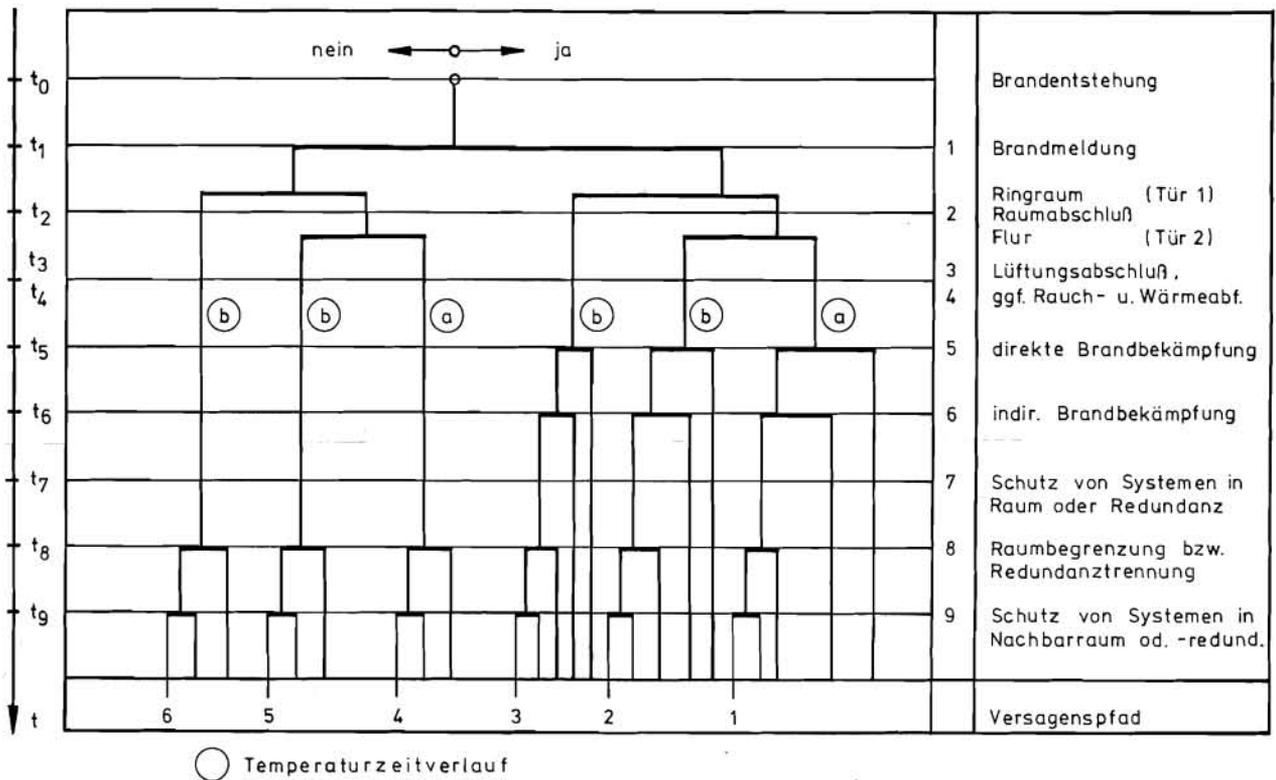


Bild 5.7/1:

Brandspezifisches Ereignisdiagramm für Brandraum E2 (Kabelverteilung im Sektor 180 - 270° auf der + 9,6 m-Ebene) und Ausfall der Nachbarredundanz

Zur Erfassung brandbedingter Aktionen und Ausfälle waren zusätzlich noch die Ansprechtemperatur von Schmelzlotsicherungen für Brandschutzklappen mit mittlerer Temperaturdifferenz zwischen Brandraum und Lüftungskanal (Variable 18-20), die Versagensgrenzen von aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen und Komponenten mit eventueller Temperaturdifferenz zwischen Brandraum und Komponente (Variable 21-26), bis zu vier Temperatur-Zeit-Verläufe mit linearisierter Erwärmungsphase und exponentiell abklingender Abkühlphase (Variable 27-40) sowie der zeitliche Ablauf der aktiven Maßnahmen und einer Brandübertragung in Nachbarbereiche (Variable 41-48) festzulegen. Die betreffenden Einflußgrößen (Basisvariablen) wurden durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Erwartungswert, Standardabweichung und Verteilungstyp) beschrieben, die - soweit sie nicht aus den Untersuchungen gemäß Kapitel 3 und den Berechnungen gemäß Abschnitt 5.6 hervorgehen - als Ergebnis von Fachgesprächen zwischen den an der Studie Beteiligten und dem Betreiber der Referenzanlage festgelegt wurden.

## 5.8 Ergebnisse der Brandgefahrenanalyse

### 5.8.1 Ergebnisse der anlagenspezifischen Analysen

Das Ergebnis der Analysen waren Häufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten für den brandbedingten Ausfall von sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten (bzw. für eine thermische Beaufschlagung radioaktiver Stoffe) für die in Abschnitt 5.4 beschriebenen und als relevant erkannten Ereignisablaufpfade. Tabelle 5.8/1 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse.

Ausgehend von den untersuchten Räumen oder Raumbereichen wird zunächst angegeben, ob es bei dem als relevant erkannten Ereignisablaufpfad zu einer Anforderung des Sicherheitssystems kommt. Des Weiteren wird aufgezeigt, inwieweit es dabei gleichzeitig auch zu einem brandbedingten Ausfall von einzelnen Redundanzen von Teileinrichtungen des Sicherheitssystems oder zu sonstigen Ausfällen sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen kommen kann. Im Falle des Raumbereiches F ergeben sich thermische Einwirkungen auf radioaktive Stoffe (Temperaturzeitverlauf (b) nach Bild 5.6/1).

Tab. 5.8/1:

Übersicht über die Ergebnisse der anlagenspezifischen Analysen

Untersuchter Raum Raumbereich	Relevanter Ereignisablaufpfad	Anforderung des Sicherheitssystems	Ausfall einzelner Redundanzen von Teilen des Sicherheitssystems <sup>1)</sup>	Häufigkeit pro Jahr nach vereinfachter Rechnung	Max. Häufigkeit nach detaillierter Rechnung (p <sub>f</sub> ) max [1/a]
A Ölbehälterraum im Sicherheitsbehälter	Brand Ölbehälterraum mit Brandübertragung auf Kabelverteilung	ja	1 von 4	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
B Bereich der Hauptkühlmittelpumpen	Brand einer Hauptkühlmittelpumpe mit Ausfall der elektr. Einrichtungen in diesem Raumbereich	ja	- <sup>2)</sup>	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
C Bereiche der Kabeldurchführung im Sicherheitsbehälter	Brand einer Kabelredundanz mit Brandübertragung auf Nachbarredundanz	ja	2 von 4	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
D Kabelschacht mit angrenzendem Flutbehälterraum	Brand im Kabelschacht mit temperaturbedingtem weiteren Kabelausfall und Brandübertragung auf Kabeltrasse (+ 9 m)	ja	2 von 4	$6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
E1 Kabelverteilung im Ringraum (+ 16 m)	Brand einer Kabelredundanz mit Brandübertragung auf Nachbarredundanz	ja	2 von 4	$6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
E2 Kabelverteilung im Ringraum (+ 9 m)	Brand einer Kabelredundanz mit Brandübertragung auf Nachbarredundanz	ja	2 von 4	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$
F Konditionierung und Lagerung für radioaktiven Abfall	Schadensfeuer im Bereich der Abfallbehandlung	nein	- <sup>3)</sup>	$4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$
G Kabelverteilung unterhalb der Warte	Brand der Kabelverteilung mit Brandübertragung auf Nachbarraum	ja	Ausfall Warte 1 von 4	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
H Ölbehälterraum im Notstromdieselgebäude	Schadensfeuer im gesamten Notstromdieselgebäude	nein	4 von 4 <sup>3)</sup>	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
I Kabelkanal zwischen Reaktorgebäude und Notspeisegebäude	Brand im Kabelkanal mit Brandübertragung in den Nachbarkanal	ja	2 von 4	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$

<sup>1)</sup> In Raum F: Thermische Einwirkung auf radioaktive Stoffe

<sup>2)</sup> Bedeutsam durch mögliche Beeinträchtigungen von Meß- und Überwachungseinrichtungen

<sup>3)</sup> Relevant nur nach brandunabhängigen Anforderungen durch andere Störfälle; Häufigkeit mit Überlagerung: ( $7 \cdot 10^{-9}$ )

Das detaillierte Rechenverfahren liefert Häufigkeiten für die genannten Auswirkungen als Funktion der Branddauer (t). Da diese Häufigkeiten aufgrund der Verwendung gleicher Brandeintrittshäufigkeiten auf ein Jahr bezogen sind, können ihre maximalen Werte (siehe Tab. 5.8/1) mit den Häufigkeiten aus der vereinfachten Rechnung verglichen werden.

Die als Funktion der Branddauer ermittelten Häufigkeiten  $p_f(t)$  werden für alle relevanten Ereignisablaufpfade graphisch dargestellt (siehe auch Fachband 3, Abschnitt 3). In Bild 5.8/1 wird als Beispiel (wieder anhand des Raumes E2) ein solcher Häufigkeitsverlauf gezeigt.

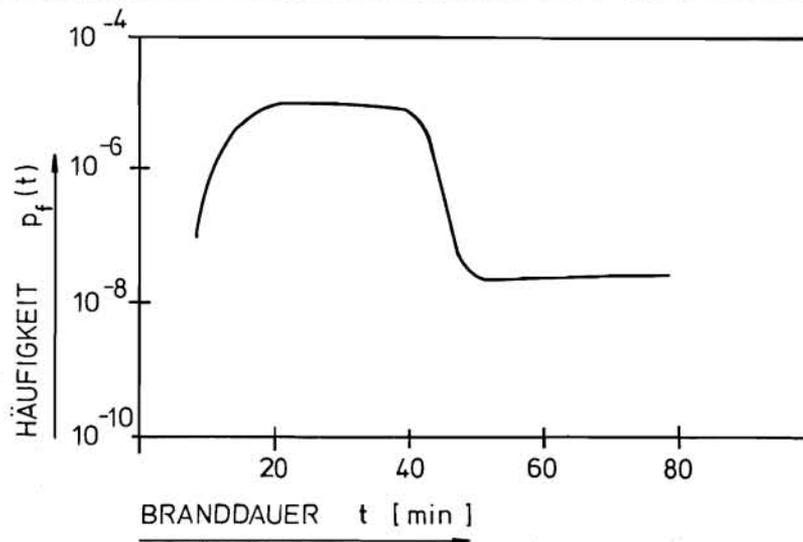


Bild 5.8/1:

Häufigkeit  $p_f(t)$  für Brand einer Kabelredundanz im Raum E2 mit Ausfall der Nachbarredundanz

Der Verlauf ist so zu verstehen, daß zu Beginn des Brandes ( $< 10$  min) die genannten Auswirkungen nur mit einer relativ geringen Häufigkeit eintreten. Danach steigt diese Häufigkeit relativ stark an. Ist es nach einer Branddauer  $> 40$  min noch nicht zu den Auswirkungen gekommen, so verringert sich die Häufigkeit dafür wieder erheblich.

Ein Vergleich der Ergebnisse der abgekürzten und detaillierten Rechnungen zeigt im allgemeinen eine gute Übereinstimmung. Das Ergebnis der abgekürzten Analyse hängt maßgeblich von der Wahl der brandbedingten Ausfallwahrscheinlichkeit von Brandschutzmaßnahmen ab. Diese werden anhand der Temperaturverläufe und aufgrund von Erfahrungen abgeschätzt.

Der Einfluß der gegenseitigen Abhängigkeit der Maßnahmen über die Brandwirkungen, der ebenfalls zu Unterschieden in den Ergebnissen führen kann, ist in den untersuchten Fällen nicht sehr ausgeprägt, weil eindeutige "Schwachpunkte" die Ergebnisse bestimmen. Die abgekürzten Rechnungen mit vorausgesetzter Unabhängigkeit der Einzelmaßnahmen (Multiplikation der Ausfallwahrscheinlichkeiten) treffen daher eher zu als solche mit Annahme strenger Korrelation. Verschiedene gegenseitig abhängige Ereignispfade können im allgemeinen ohne großen Genauigkeitsverlust wie ein Seriensystem mit unabhängigen Teilsystemen (Addition der einzelnen Ausfallhäufigkeiten) behandelt werden.

Neben den aufgezeigten Häufigkeiten  $p_f(t)$  geben die detaillierten Rechnungen noch Auskunft über den Einfluß der einzelnen Versagenspfade sowie über die Bedeutung der einzelnen Brandschutzmaßnahmen bei diesen Versagenspfaden (vgl. Abschnitt 3.7). Maßgebende Versagenspfade sind diejenigen mit der größten Einzelversagenswahrscheinlichkeit. Im Rahmen der angestrebten Rechengenauigkeit müssen in der Regel nur wenige Pfade berücksichtigt werden, da alle anderen vernachlässigbare Beiträge zur Gesamtversagenswahrscheinlichkeit leisten.

Für alle definierten Einflußgrößen (Basisvariablen gemäß Tabelle 5.8/2) werden sogenannte Wichtungsfaktoren  $\alpha_i$  zu verschiedenen Zeitpunkten des Brandgeschehens berechnet. Die nachfolgende Tabelle 5.8/2 (Beispiel: Raum E2) enthält die Wahrscheinlichkeitswerte  $p_f$  für bestimmte Brandzeiten und die jeweils geltenden Wichtungsfaktoren für die 48 Einflußgrößen (Dezimalsprünge der Einflußgrößenbezeichnung zeilenweise). Werte  $\alpha_i > 0$  bedeuten eine günstige Wirkung (Minderung von  $p_f$ ) der betreffenden Einflußgröße, Werte  $\alpha_i < 0$  eine ungünstige Wirkung (Vergrößerung von  $p_f$ ). Beträge  $|\alpha_i|$  nahe 1,0 deuten auf einen großen Einfluß,  $|\alpha_i|$  nahe 0 auf keinen wesentlichen Einfluß. Die Quadrate der Wichtungsfaktoren addieren sich zu 1,0; indem man diese  $\alpha_i^2$  grafisch übereinander aufträgt, kann man das mit der Branddauer  $t$  veränderliche Gewicht der verschiedenen Einflußgrößen als Flächenanteil veranschaulichen (Bild 5.8/2; Numerierung der Einflußgrößen entsprechend Tabelle 5.7/2).

Tab. 5.8/2:

Häufigkeiten  $p_f$  und Wichtungsfaktoren  $\alpha_i$  für den Raum E2 (Brand mit Ausfall der Nachbarredundanz) zu verschiedenen Zeitpunkten  $t$

Brandzeit  $t = 10$  min  $p = 3,449 \text{ E-}07$

Wichtungsfaktoren:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	-0,003	-0,001	-0,002	-0,001	0,260	0,260	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,925	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0,000	-0,097	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		

Brandzeit  $t = 25$  min  $p = 7,927 \text{ E-}06$

Wichtungsfaktoren:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	-0,004	-0,002	-0,003	-0,001	0,363	0,364	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,830	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0,000	-0,216	-0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,002	-0,001	0,000		

Brandzeit  $t = 50$  min  $p = 2,443 \text{ E-}08$

Wichtungsfaktoren:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	-0,003	-0,001	-0,002	-0,001	0,228	0,228	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,350	0,000	0,000	0,000
20	0,074	0,000	0,000	0,000	0,297	0,122	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0,000	-0,297	-0,035	0,744	0,003	-0,144	0,000	0,000	0,000	0,000
40	-0,029	-0,013	0,000	0,000	0,000	-0,012	-0,008	0,000		

Brandzeit  $t = 75$  min  $p = 2,950 \text{ E-}08$

Wichtungsfaktoren:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	-0,003	-0,001	-0,002	-0,001	0,229	0,229	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,359	0,000	0,000	0,000
20	0,075	0,000	0,000	0,000	0,301	0,057	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0,000	-0,273	-0,034	0,761	0,001	-0,105	0,000	0,000	0,000	0,000
40	-0,030	-0,013	0,000	0,000	0,000	-0,012	-0,008	0,000		

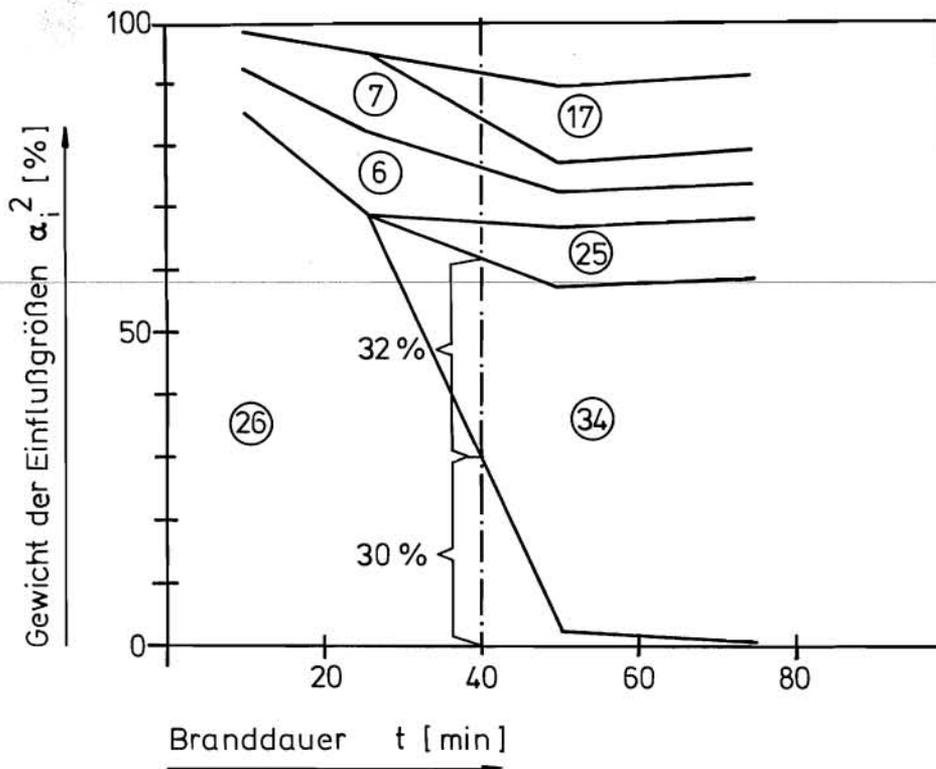


Bild 5.8/2:

Relatives Gewicht der Einflußgrößen des Ereignisablaufdiagramms (Raum E2) in Abhängigkeit von der Branddauer

Zum Beispiel gilt für einen Zeitpunkt 40 Minuten nach Brandeintritt folgende Gewichtsverteilung für die angegebenen Einflußgrößen:

- Die Anfangstemperatur des Temperaturzeitverlaufes a (26) trägt abnehmend nur noch mit 30 % zur Häufigkeit  $p_f$  der Auswirkungen bei.
- Der Exponent der Abkühlkurve des Temperaturzeitverlaufes b (34) trägt zunehmend mit 32 % zur Häufigkeit  $p_f$  bei.
- Die ertragbare "Wärmeenergie" der Brandraumbegrenzung (25) hat einen geringfügig zunehmenden Anteil von 6 %.
- Die Wahrscheinlichkeiten für das Offenstehen von Türen (6) und (7) tragen abnehmend mit einem Anteil von jeweils ca. 8 % bei.
- Die Ausfallwahrscheinlichkeit der indirekten Brandbekämpfung (17) trägt zunehmend mit einem Anteil von 7 % bei.

- Das Gewicht der sonstigen Einflußgrößen hat zu diesem Zeitpunkt einen Anteil von ca. 8 %.

Solche in der detaillierten Ereignisablaufanalyse anfallende Zusatzinformationen über wesentliche Versagenspfade und Einflußgrößen werden im Zuge der Optimierungsüberlegungen (Abschnitt 6.2 und 6.3) wieder aufgegriffen.

#### 5.8.2 Aspekte des Personenschutzes

Die Ermittlung der Raumtemperaturen in den ausgewählten Räumen diene der Feststellung, ob und zu welchem Zeitpunkt mit einem brandbedingten Versagen von anlagentechnischen und insbesondere sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen zu rechnen ist. Hinsichtlich des Schutzes des Betriebspersonals spielt die Verqualmung als Brandwirkung (Sichtbehinderungen, toxische Wirkungen) eine dominierende Rolle. Im Vordergrund steht dabei die Frage, wie schnell Brandräume und benachbarte Räume so verqualmt sind, daß eine Flucht des vorhandenen Personals und eine Rettung möglicherweise verletzter Personen erheblich beeinträchtigt wird. Dabei ist auch die mögliche Gefährdung der Feuerwehrkräfte zu beachten.

In Fachband 1, Teil A, Kapitel 8 werden Ansätze zur Berechnung der Verqualmungszeiten in Abhängigkeit vom Raumvolumen, der freiwerdenden Wärmeenergie, einer sich einstellenden Rauchsichtung und sonstigen Einflußgrößen beschrieben. Anhand von Parametervariationen werden dabei auch Raumverhältnisse untersucht, wie sie im Kernkraftwerk gegeben sind. Die Situation im Kernkraftwerk hinsichtlich der Verqualmung sowie der Flucht- und Rettungsmöglichkeiten wird dadurch bestimmt, daß sie je nach Gebäudebereich sehr unterschiedlich zu bewerten ist.

Außerhalb des Kontrollbereiches liegen im allgemeinen räumliche und lüftungstechnische Gegebenheiten wie in anderen konventionellen Industrieanlagen, insbesondere in konventionellen Kraftwerken, vor. In den anlagenspezifischen Analysen wurden drei Räume (Brandräume G, H, I) untersucht, die außerhalb des Kontrollbereiches liegen. Gesichtspunkte einer besonderen Gefährdung von Personen wurden bei diesen Untersuchungen nicht erkannt. Zum Schaltanlagegebäude ist anzumerken, daß

maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) in einzelnen Räumen den Temperatur-Zeitverlauf zwar ungünstig beeinflussen können, für die Reduzierung der Verqualmung benachbarter Räume unter Personenschutz Gesichtspunkten aber günstig sind.

Innerhalb des Kontrollbereiches liegen gegenüber anderen konventionellen Industrieanlagen in Kernkraftwerken besondere Verhältnisse vor. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß die Möglichkeit der Rauchabfuhr und damit die Reduzierung einer Verqualmung eingeschränkt ist. Wie im Fachband 2, Teil C näher ausgeführt wird, kann bei einem Brand in diesen Räumen die Abschaltung bzw. Absperrung von Lüftungsanlagen notwendig werden, um Einrichtungen zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe (Schwebstofffilter, Aktivkohlefilter u.a.) vor unzulässigen Beeinträchtigungen zu schützen. Die beschriebenen Ansätze zur Berechnung der Verqualmung gelten für geschlossene Räume und sind deshalb insbesondere auf diese Raumbereiche anwendbar.

In den anlagenspezifischen Analysen wurden Räume des Kontrollbereiches im Reaktorhilfsanlagengebäude (Raum F), im Reaktorgebäude-Ringraum (Räume D, E) und im Reaktorgebäude-Innenraum (Räume A, B, C) untersucht. Im allgemeinen ist die Fluchtwegsituation im Reaktorhilfsanlagengebäude und im Reaktorgebäude-Ringraum günstig. Aufgrund einer Vielzahl von Fluchtmöglichkeiten, teilweise über Notausgänge unmittelbar ins Freie, ergeben sich relativ kurze Flucht- und Rettungsweglängen, die für die meisten Räume deutlich kürzer als die vorgeschriebenen maximal zulässigen Rettungsweglängen sind. Darüber hinaus sind die Rettungswege in allen Gebäuden mit einer speziellen Notbeleuchtung sowie mit besonderen Kennzeichnungen und Fluchtwegmarkierungen versehen. Die untersuchten Räume im Reaktorhilfsanlagengebäude und im Reaktorgebäude-Ringraum stellen auch die Räume mit den größten Brandlasten in diesen Gebäudeteilen dar. Hinsichtlich der unmittelbaren Flucht und Rettung von Personen ergaben sich aus unseren Untersuchungen keine Gesichtspunkte für eine besondere Gefährdung bei einem Brand in diesen Räumen. Dazu ist anzumerken, daß eine gezielte Prüfung der Rettungswegsituation in den einzelnen Gebäuden entsprechend der vorgesehenen Aufgabenstellung der Studie nicht durchgeführt wurde.

Etwas anders stellt sich die Situation im Reaktorgebäude-Innenraum (Sicherheitsbehälter) dar. Abschätzungen anhand der im Fachband 1, Teil A, Kapitel 8 durchgeführten exemplarischen Rechnungen zeigen, daß mit einer für das Personal kritischen Verqualmung des Sicherheitsbehälters, ausgehend von einem Ölbrand (Räume A, B) oder einem Kabelbrand (Bereich der Kabeldurchführungen C), spätestens nach 15 Minuten gerechnet werden muß. Die Situation der Rettungswege im Sicherheitsbehälter ist dadurch gekennzeichnet, daß es nur wenige Ausgänge (große Personenschleuse, eine Notschleuse) und aufgrund der kugelförmigen Geometrie teilweise ungünstig weite Rettungswege zu diesen Ausgängen gibt. Weite Rettungswege gibt es allerdings nur von Stellen (z.B. Sumpf, Kranbahn), die im Normalbetrieb praktisch nicht und im Revisionsfall selten betreten werden.

Hinsichtlich einer Gefährdung des Personals ist zu berücksichtigen, daß sich bei Betrieb des Reaktors keine oder nur wenige Personen im Sicherheitsbehälter aufhalten. Die maximale Anzahl der bei Betrieb des Reaktors anwesenden Personen ist durch behördliche Auflagen eng begrenzt. Bei Instandhaltungsarbeiten in der Revisionsphase kann die Anzahl der anwesenden Personen wesentlich größer sein. In diesem Falle kommen allerdings besondere Vorkehrungen zur Branderkennung, Brandbekämpfung und Verbesserung der Fluchtwegsituation (Regelung zum Offenhalten bzw. Öffnen der Personenschleuse) zum Tragen.

## 6. OPTIMIERUNG DES BRANDSCHUTZES

### 6.1 Optimierungskonzepte

Eine Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken kann auf verschiedenen Wegen erfolgen, z.B. durch

- Minimierung der Gesamtkosten aus Errichtungs-, Kontroll- und Schadenskosten bei Vorgabe einer zulässigen Häufigkeit bestimmter Konsequenzen,
- Minimierung der Häufigkeit brandbedingter Konsequenzen unter Vorgabe konstanter Gesamtkosten durch Ergänzung oder Austausch von Brandschutzmaßnahmen,
- Ermittlung der dominierenden Versagenspfade von brandspezifischen Ereignisablaufdiagrammen und der wesentlichsten Einflußgrößen und Reduktion der Häufigkeit von Konsequenzen durch gezielte Modifikation der maßgebenden Brandschutzmaßnahmen.

Für die beiden ersten Wege muß der funktionale Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Kosten für jede aktive und passive Brandschutzmaßnahme bekannt sein. Ebenso müssen die möglichen Schadenskosten raumweise in Abhängigkeit von Brandverlauf und vorhandenen Einrichtungen bestimmt werden. Diese Funktionen sind mit dem zur Zeit vorliegenden Datenmaterial nicht quantifizierbar; die Beschaffung zusätzlicher Informationen war im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Eine weitere Voraussetzung ist die mathematische Formulierbarkeit. Im vorliegenden Fall müssen mehrere Optimierungsziele - Minimieren der Häufigkeit von Konsequenzen bzw. der Gesamtkosten, Maximieren des Personenschutzes und des Sachschutzes - parallel verfolgt werden. Dabei sind eine Reihe von Restriktionen zu beachten, die einen physikalisch sinnvollen Ergebnisraum eingrenzen. Unter diesen Bedingungen ist die mathematische Bewältigung des Optimierungsproblems äußerst schwierig und - selbst bei Vorliegen der notwendigen Informationen - allein vom Rechenaufwand her extrem aufwendig.

Damit bleibt der pragmatische dritte Weg, der insbesondere auch deshalb völlig ausreichend erscheint, weil die Mehrkosten für bessere bzw. effektivere Brandschutzmaßnahmen im Vergleich zu den zu erwartenden Scha-

denkskosten durchweg unerheblich sind. Sieht man die raumspezifischen Schadenskosten einmal als (zur Zeit noch unbekannte) konstante Größe an, dann können die Gesamtkosten allein durch Reduktion der Häufigkeit der unerwünschten Konsequenzen beeinflusst werden. Somit bleibt als sinnvolles Optimierungsziel die raumweise optimale Anpassung des Brandsicherheitsniveaus (d.h. der Häufigkeit der unerwünschten Konsequenzen) an die Bedeutung dieser Konsequenzen für nukleare Sicherheit, Personenschutz und Sachschutz (d.h. an die Schadenskosten) durch effektivere Gestaltung der Brandschutzmaßnahmen. In der vorliegenden Studie orientieren sich die Optimierungsüberlegungen nur an der sicherheitstechnischen Relevanz der Brandschutzmaßnahmen.

## 6.2 Folgerungen aus den Optimierungsanalysen

Wesentlicher Anhalt für die Bewertung von Verbesserungsmöglichkeiten im Brandschutzkonzept sind die bei der Quantifizierung der brandspezifischen Ereignisabläufe gewonnenen Informationen über die maßgebenden Versagenspfade und die maßgebenden Einflußgrößen (vgl. Abschnitt 3.7 und 5.8.1). In allen untersuchten Raumbereichen spielen die Versagenspfade mit Ausfall der Brandmeldung keine Rolle; dies war wegen der großen Zuverlässigkeit der Brandmeldung und der im Vergleich dazu wesentlich geringeren Erfolgsaussichten der vorgesehenen Brandbekämpfungsmaßnahmen zu erwarten.

Generell ist eine Minimierung der Brandeintrittshäufigkeiten anzustreben. Vom Brandschutzkonzept her wird dies bereits durch immer weitere Reduzierung der Brandlasten und Vermeidung von Zündquellen verfolgt. Darüber hinaus ist durch regelmäßige Kontrollen das Auftreten von unplanmäßigen Brandlasten und Zündquellen zu verhindern oder - falls diese zeitweise unvermeidlich sind - zu überwachen.

Von besonderer Bedeutung sind diejenigen Versagenspfade, bei denen die Brandraumtemperaturen aufgrund zusätzlicher Ventilation, z.B. Offenstehen von Türen, so hoch werden, daß Komponenten oder sogar passive Brandschutzeinrichtungen versagen. Unplanmäßig offenstehende Türen sind auch wegen des damit von vornherein fehlenden Raumabschlusses kritisch. Die Brandübertragung erfolgt dadurch so schnell, daß die vor-

handenen Brandbekämpfungsmaßnahmen wegen des Zeitverzugs zwischen Meldung und Wirksamwerden noch keinen Einfluß auf die Ausfallwahrscheinlichkeit von Komponenten haben. Das zuverlässige Schließen von Brandschutztüren ist aus diesem Grunde eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Brandbekämpfung, sofern diese nicht - unter Vermeidung des Zeitverzuges - automatisch erfolgt.

Aufgrund der relativ niedrigen Versagenstemperaturen der elektrischen und elektronischen Teile von Komponenten und Systemen (vgl. Abschnitt 5.4) sind brandbedingte Komponentenausfälle in den vom Brand betroffenen Raumbereichen praktisch unvermeidlich. Weder manuelle Löschnahmen noch manuell vor Ort ausgelöste stationäre Löschanlagen sind bei den untersuchten Raumbereichen in der Lage, dies zu verhindern, da sie erst wirksam werden, wenn die Brandraumtemperaturen bereits über die Versagenstemperaturen der Komponenten hinaus angestiegen sind. Hier könnte nur eine unmittelbar nach Meldung automatisch oder manuell von der Warte ausgelöste Löschanlage Abhilfe schaffen.

Die Wahrscheinlichkeit brandbedingter Komponentenausfälle in Nachbarbereichen kann durch die indirekte Brandbekämpfung dann wirksam reduziert werden, wenn eine Brandübertragung in Nachbarbereiche im frühen Stadium des Brandes durch vorhandene passive Brandschutzeinrichtungen verhindert wird. Andernfalls kommt die indirekte Brandbekämpfung - wegen des Zeitverzuges bis zum Einsatz der Betriebsfeuerwehr vor Ort - zu spät.

Die vorhandenen passiven Brandschutzeinrichtungen kommen vorwiegend bei Raumbereichen mit größeren Brandlasten und gegebenenfalls zusätzlicher Ventilation durch offenstehende Türen nach Versagen der Brandbekämpfung zum Tragen. Größere Bedeutung für die Häufigkeit von Konsequenzen haben sie bei wenig zuverlässiger Brandbekämpfung oder bei unzureichendem Feuerwiderstand (z.B. Dämmschichtbildner zum Schutz von nullredundanten Kabeln, Stahlklappe zwischen redundanten Kabelverteilungen im Ringraum).

Hinsichtlich der aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen ergeben sich im einzelnen folgende Erkenntnisse oder Empfehlungen:

- Die Brandmeldung ist ausreichend zuverlässig, sofern eine regelmäßige Kontrolle der Funktionsfähigkeit sichergestellt ist.
- Ein günstig auf die Brandraumtemperaturen wirkender Lüftungsabschluß (Zuluft) in den betroffenen Brandräumen durch Schließen von Brandschutzklappen über Schmelzlotsicherungen ist aufgrund nicht erreichter Auslösetemperaturen (rechnerisch ermittelt) im Zuluftkanal und der geringen Zuverlässigkeit der manuellen Betätigung sehr unsicher. Hier wären zuverlässigere Auslösemechanismen, insbesondere zum Schließen der Brandschutzklappe im Zuluftkanal anzustreben. Ein Lüftungsabschluß hat nur Sinn, wenn auch die Türen des betroffenen Raumes zuverlässig geschlossen werden.
- Die Wahrscheinlichkeit für das Offenstehen von normalerweise geschlossenen Brandschutztüren ist durch organisatorische Vorkehrungen zu reduzieren (Kontrollgänge und Schließenanweisungen). Falls ein häufiges Öffnen von Brandschutztüren aus betrieblichen Gründen erforderlich ist, sollte generell eine offengehaltene Tür mit im Brandfall auslösender Feststellanlage vorgesehen werden.
- Die Inbetriebnahme von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) hat eine zusätzliche Ventilation zur Folge und verschärft den Brandverlauf. Dieser Nachteil ist abzuwägen mit den Vorteilen für den Schutz des Betriebspersonals und der Feuerwehr (Reduzierung der Verqualmung) sowie für den Sachschutz (Abzug korrosiver Rauchgase). Im Falle des Brandraumes G ist die negative Auswirkung der RWA begrenzt, so daß die Vorteile für Personen- und Sachschutz überwiegen.
- Eine manuelle Brandbekämpfung ist nur dort sinnvoll, wo
  - keine großen Brandlasten vorhanden sind;
  - Personal ständig vor Ort ist oder zumindest sehr rasch (weniger als 10 min) nach Meldung die Brandbekämpfung aufnehmen kann, und wenn der Brandherd gut zugänglich ist (Nur im frühen Brandstadium sind Raumtemperaturen zu erwarten, die ein manuelles Eingreifen ermöglichen.);
  - die Folgeschäden, z.B. durch korrosive Rauchgase, begrenzt sind,
  - nicht durch notwendiges Öffnen von Türen der Brandverlauf verschärft wird (z.B. Brandraum A, D, E2 oder F).

- Mit dem Einbau stationärer Löschanlagen würde die Brandbekämpfung in den Räumen E1, E2, F und G grundsätzlich verbessert. Insbesondere im Brandraum F würden sich bei Berücksichtigung einer solchen Anlage (schnelle Auslösung im Brandfall vorausgesetzt) die ermittelten Häufigkeiten für die Auswirkungen in den relevanten Ereignisablaufpfaden deutlich reduzieren.
- Die manuelle Auslösung der stationären Löschanlagen vor Ort ist durchweg mit großem Zeitverzug verbunden; das hat ungünstige Auswirkungen auf die Brandentwicklung, den Personenschutz und die Folgeschäden. Bei einem ungünstigen Brandverlauf ist sogar ein brandbedingter Ausfall der Löschanlage vor ihrer Auslösung (mit Zeitverzug) zu erwarten (z.B. im Brandraum A, F, G, H und I)<sup>1)</sup>. Die ermittelten Häufigkeiten für die Auswirkungen in den relevanten Ereignisablaufpfaden würden sich für Räume mit stationären Löschanlagen (Brandraum A, B, C, H, I) wesentlich verringern, wenn die Auslösung dieser Anlagen unmittelbar nach der Brandmeldung erfolgt. Eine automatische oder direkte manuelle Auslösung von der Warte nach erfolgter Brandmeldung ist insbesondere dort zu empfehlen, wo unerwünschte Konsequenzen sehr rasch eintreten oder wo große Folgeschäden und die Gefährdung von Personen durch Rauchentwicklung zu befürchten sind (in nahezu allen Brandräumen, insbesondere jedoch in den Räumen B, F und H).
- Es wird empfohlen, die Möglichkeiten der indirekten Brandbekämpfung zur Verhinderung einer Brandausbreitung und Gefährdung von Personen und Systemen in Nachbarbereiche planmäßig vorzusehen. Die Effektivität der indirekten Brandbekämpfung läßt sich durch sorgfältige und gezielt ausgearbeitete Einsatzpläne steigern. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von Komponenten kann durch die indirekte Brandbekämpfung allerdings nur in solchen Fällen beeinflusst werden, in denen keine frühzeitige Brandübertragung stattfindet; in jedem Falle werden aber die Folgeschäden günstig beeinflusst.
- Bei den passiven Brandschutzeinrichtungen sind nennenswerte Schwachpunkte im allgemeinen nicht aufgetreten. Die brandschutztechnische

---

<sup>1)</sup> Stationäre Löschanlagen sind in den Räumen A, H und I.

Auslegung nach DIN 4102 für die Feuerwiderstandsklasse  $\geq$  F 90 bietet zumindest für die in der Referenzanlage zu erwartenden Brandverläufe einen recht zuverlässigen Schutz. Eine Ausnahme bilden die Dämmschichtbildner, die eine Brandausbreitung bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen (Wärmestau) nicht verhindern. Kleine Schwachpunkte, z.B. durch unplanmäßiges Offenhalten von Kabel- und Rohrleitungsdurchführungen, wurden nicht betrachtet. Die Entdeckung und unverzügliche Beseitigung derartiger erfahrungsgemäß nicht unwahrscheinlicher Mängel kann durch regelmäßige Überwachung sichergestellt werden.

- Im Hinblick auf den Personen- und Sachschutz sind Kabelisolierungen mit geringer Rauchentwicklung zu bevorzugen. Neuere Kabelentwicklungen bieten darüber hinaus noch den Vorteil einer schlechteren Brandfortleitung, wie sich bei den Versuchen (siehe Fachband 2) gezeigt hat. Ähnliche Entwicklungen bei Ölen, Steuerflüssigkeiten, Anstrichen usw. sollten gefördert werden.

Unsere Aussagen zur Optimierung der Brandschutzmaßnahmen orientieren sich, wie schon erwähnt, im wesentlichen an sicherheitstechnischen Gesichtspunkten. Abschließend sei aber darauf hingewiesen, daß auch unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit die aufgezeigten Verbesserungsmöglichkeiten von Interesse sein dürften.

## 7. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

### 7.1 Theoretische Grundlagenuntersuchungen

In der vorliegenden Studie wurden als ein Schwerpunkt der theoretischen Arbeiten die zur Beschreibung der Brandwirkungen in Gebäuden im Falle eines realen Schadenfeuers erforderlichen physikalischen Grundlagen anhand des derzeitigen Kenntnisstandes der Thermodynamik, Wärme- und Brennstofftechnik und Strömungsmechanik dargestellt. Die vorhandenen Rechenmodelle auf der Basis der Massen- und Energiebilanz (Wärmebilanzmodelle) wurden im Fachband 1 erläutert und hinsichtlich ihrer Anwendungsgrenzen überprüft.

Durch Modifikation und Erweiterung der in der klassischen Brandschutzforschung entwickelten Rechenmodelle konnten diese den speziellen brandschutztechnischen Randbedingungen in Kernkraftwerken besser angepaßt werden. Insbesondere ist es gelungen, den Einfluß der Zwangsventilation, die Wirkung von Löschmaßnahmen sowie die Brandausbreitung in Zweiraumgeometrie zu erfassen. Außerdem konnte die Rauchentwicklung und -ausbreitung in geschlossenen Systemen (z.B. im Containment) mit einigen vereinfachenden Annahmen berechnet werden. In den experimentellen Untersuchungen (vgl. Abschnitte 4.3 und 7.2) konnten die so erweiterten Wärmebilanzmodelle verifiziert werden. Sie erscheinen nunmehr für eine hinreichend realistische Vorhersage der globalen Brandwirkungen in ausgewählten Raumbereichen angemessen. Detailliertere Aussagen sind allenfalls mit erheblich aufwendigeren Modellen nach entsprechender experimenteller Absicherung zu erzielen.

Brandeintrittshäufigkeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten aktiver Brandschutzmaßnahmen sind im wesentlichen in Anlehnung an statistische Auswertungen amerikanischer Daten ermittelt worden. Die Übertragbarkeit dieser Daten auf die Verhältnisse in deutschen Kernkraftwerken wurde ausführlich diskutiert. Sie erscheint bei Beachtung der Vergleichbarkeit der Randbedingungen als gewährleistet. Dies hat sich insbesondere bei der Auswertung von deutschem Datenmaterial zur Ausfallwahrscheinlichkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen bestätigt.

Die Ausfallwahrscheinlichkeiten passiver Brandschutzeinrichtungen sind auf zwei unterschiedlichen Wegen ermittelt worden. Zum einen wurden verfügbare Ergebnisse von Normbrandversuchen nach DIN 4102 an Türen, Brandschutzklappen, Kabelschotts und leichten Trennwänden statistisch ausgewertet; die dabei erhaltenen Mittelwerte und Streuungen der Feuerwiderstandsdauer können mit Hilfe eines Energiekriteriums auch auf natürliche Brandverläufe übertragen werden. Zum anderen wurden verschiedene Stahlbetonbauteile, wie sie in Kernkraftwerksgebäuden vorkommen, probabilistisch im Hinblick auf ihre Versagenswahrscheinlichkeit bei einem Normbrand und bei einem natürlichen Brandverlauf untersucht. Auf beiden Wegen lassen sich zu jeder gegebenen Brandbeanspruchung die brandbedingten Ausfallwahrscheinlichkeiten ohne großen Aufwand bestimmen.

Die Methodik der Brandgefahrenanalyse orientiert sich im Grundsatz am amerikanischen Vorbild der Fire Hazard Analysis. Sie umfaßt als ersten Schritt eine raumbezogene Bestandsaufnahme, anhand derer die kritischen Raumbereiche auszuwählen und die brandspezifischen und sicherheitstechnischen Randbedingungen für die weitere Untersuchung zu formulieren sind. Von der amerikanischen Vorgehensweise wurde insofern abgewichen, als die Raumauswahl pragmatischer erfolgte, aber die brandspezifischen Randbedingungen wesentlich detaillierter erfaßt wurden. Im zweiten Schritt sind mögliche brandspezifische Ereignisabläufe zu bestimmen, in denen die einzelnen aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen berücksichtigt sind. Im Gegensatz zu den amerikanischen Studien wurde in den brandspezifischen Ereignisabläufen der zeitliche Ablauf und die Beeinträchtigung der Maßnahmen durch die realen Brandwirkungen stärker berücksichtigt. Im letzten Schritt sind die Häufigkeiten derjenigen Brandereignisabläufe zu berechnen, die zum Ausfall von Komponenten und Systemen bzw. zur Gefährdung von Personen führen.

Ein entscheidender Fortschritt gegenüber der amerikanischen Methodik wurde bei der Quantifizierung der brandspezifischen Ereignisabläufe mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie erzielt. Hierzu wurden für alle aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen sowie für die systemtechnischen Komponenten Versagensmodelle formuliert, deren Einflußgrößen mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben sind. Die gegenseitige Abhängigkeit verschiedener Maßnahmen über gemeinsame Ein-

flußgrößen, z.B. über die Brandwirkungen und den zeitlichen Ablauf, wird bei der Ereignisablaufanalyse berücksichtigt. Als Ergebnis erhält man Häufigkeiten der unerwünschten Konsequenzen sowie Angaben über das relative Gewicht aller Einflußgrößen eines Ereignisablaufdiagramms in Abhängigkeit von der Branddauer. Diese Informationen sind eine notwendige Voraussetzung für eine Optimierung der Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen (vgl. Abschnitt 7.3 und 7.4).

## 7.2 Experimentelle Grundlagenuntersuchungen

Zur Beurteilung von Brandereignisabläufen und der theoretischen Erfassung von Bränden in Kernkraftwerken bedarf es begleitender experimenteller Grundlagenuntersuchungen. Es wurden Versuchsbrände in Räumen vergleichbarer Geometrie durchgeführt, die unabdingbare Voraussetzung zur Verifizierung der verbesserten Rechenmodelle sind.

Im ersten Teil des experimentellen Versuchsprogramms wurde das Abbrandverhalten verschiedener Kabelisolierungen und Flüssigkeiten (Öl) untersucht, wobei die wesentlichen Parameter - die Abbrandgeschwindigkeit, die Brandausbreitung, die Ventilationsgröße und -richtung sowie die Zündquelle - untersucht wurden, um sinnvolle Randbedingungen für die Großversuche zu erhalten.

Brände mit Öl zeigen bei genügender Ventilation und ausreichendem Ölvorrat ein deutlich höheres Temperaturniveau. Es werden Spitzentemperaturen bis 1400 °C erreicht.

Die Brandausbreitung auf Kabelisolierungen kann stark schwanken. Sie hängt von der Größe der Zündquelle und der Art der Ventilation ab. Bei genügend starker Ventilation längs der Kabel steigert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Kabeloberfläche. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird zusätzlich durch eine Massierung von Kabelmaterial und eine Vorwärmung der Kabel unter Last erhöht. Es zeigte sich, daß unter diesen Randbedingungen jede Art von Kabelmaterial eigenständig abbrennt. Ebenso behindern Dämmschichtbildner und nichtbrennbare Gewebe unter diesen Voraussetzungen nur unwesentlich die Brandausbreitung. Andererseits zeigte sich, daß neuere Kabelentwicklungen bei für den Brand un-

günstigeren Randbedingungen deutliche Vorteile hinsichtlich der Verhinderung der Brandausbreitung bieten.

Als Konsequenz der kleinmaßstäblichen Versuche ergaben sich Großbrandversuche mit Kabelbrandlasten, da hier das Brandverhalten stark von den vorliegenden Randbedingungen abhängt und außerdem Kabelbrandlasten in den meisten zur Diskussion stehenden Räumen vorhanden waren. Als Brandrandbedingungen wurden, ausgehend von der Raumwahl nach sicherheitstechnischen Gesichtspunkten, die Raumgröße und die Brandlast als maßgebende Kriterien gewählt, wobei zusätzlich als Ventilation die im Kernkraftwerk möglichen Verhältnisse festgelegt wurden, die die höchste Brandbeanspruchung erwarten ließen.

Der Vergleich von Rechenwerten mit modifizierten Modellen und Messungen in den entsprechenden Großversuchen zeigte in der Tendenz eine zufriedenstellende Übereinstimmung, wenn man berücksichtigt, daß sowohl die Wärmebilanzrechnung als auch der Nachweis über DIN 4102, gegebenenfalls unter Anwendung einer äquivalenten Branddauer, nur Näherungsverfahren sind, die Auswirkungen eines natürlichen Brandes darzustellen und die Wertigkeit von Brandschutzmaßnahmen zu beurteilen.

Eine Wertung der Versuchsergebnisse an den Einbauteilen belegt, daß bei den im Versuch gewählten Brandlasten auch unter ungünstigsten Randbedingungen die klassifizierten F90- bzw. T90-Bauteile die Brandübertragung verhindern konnten.

Bei höheren Brandlasten, wie sie in einzelnen Räumen (z.B. Kabelkeller, Ölbehälterräume), insbesondere in Bereichen mit geringerer sicherheitstechnischer Relevanz möglich sind, kann diese Gewähr jedoch nicht ohne weiteres gegeben werden. Für diese Räume ist im Einzelfall zu prüfen, ob Bauteile mit höherer Feuerwiderstandsfähigkeit vorgesehen werden sollen oder ob unter Berücksichtigung der möglichen Ventilation, der Eingriffsmöglichkeiten in die Ventilation (Raumabschluß, Lüftungsabschluß) und der vorgesehenen Brandbekämpfungsmaßnahmen die üblichen F90- bzw. T90-Bauteile ausreichen.

Durch die Versuche konnten auch für den Einbau von Einzelbauteilen Hinweise abgeleitet werden, die für die Sicherheit der Anlage von entschei-

dender Bedeutung sein können. Es wurde deutlich, daß gerade in Kernkraftwerken redundanztrennende Bauteile möglichst rauchdicht sein sollten, um die Übertragung z.B. von korrosiven Gasen zu verhindern. Die untersuchten luftdichten Türen haben diese Anforderung, im Gegensatz zu den bisher bekannten T90-Türen, weitgehend erfüllt.

Die Untersuchungen an den Schotts haben gezeigt, daß in vielen Fällen durchaus der Einsatz von Mineralfaser-Kabelschotts sinnvoll ist, besonders dort, wo temperaturbedingte Verschiebungen der Trasse zu erwarten sind. Gerade bei den Deckenschotts stellte sich heraus, daß Mörtelschotts bei Verschiebung der Kabeltrasse breite Risse aufweisen, während Mineralfaser-Schotts insgesamt jedoch dichter bleiben. Unabhängig von der Bauart des Schotts sind bei der Beurteilung der Schottmaßnahmen Aufbau und Verankerung der Kabelbahnen mit zu berücksichtigen. Das gleiche gilt auch für die Beurteilung von Rohrabschottungen.

Die Wertung der Versuche läßt die Schlußfolgerung zu, daß die Brandwirkungen in Kernkraftwerken durch die entwickelten Wärmebilanzmodelle zu erfassen sind und daß die Anforderungen an die Qualität baulicher Brandschutzmaßnahmen durchaus in Anlehnung an DIN 4102 gestellt werden können, wobei eine Abstufung der Maßnahmen unter Berücksichtigung eines Bemessungskonzepts, z.B. im Rahmen von KTA 2101.2 (in Vorbereitung), zu befürworten ist.

Als dritter Aspekt wurde bei den Brandversuchen die Ablagerung von Aerosolen in Luftkanälen sowie an Filtern untersucht. Bei Ölbränden mit geringer Energiefreisetzung wird viel Ruß freigesetzt. Die Brände an Kabelmaterialien bis auf FRNC-Kabel neigten zu ähnlich starker Rauchentwicklung unter zusätzlicher Freisetzung von großen Mengen toxischer und aggressiver Gasbestandteile. Etwa 10 Minuten nach Brandbeginn konnte unter den vorhandenen Versuchsbedingungen die Strömung im Luftkanal nicht weiter voll aufrechterhalten werden. Nach weiteren 8 Minuten war die Funktionsfähigkeit der Filter so stark herabgesetzt, daß lediglich die Hälfte des vorgegebenen Volumenstroms durch den Filter gefördert wurde.

Die verstärkte Freisetzung von Rauch, Aerosolen und aggressiven Rauchgasbestandteilen gegenüber einem Ölbrand zeigt sich in den Meßergebnis-

sen der Aerosolablagerung auf den Luftkanalwänden, in der Gewichtszunahme pro Zeit bei der isokinetischen Probennahme sowie der Rauchgasanalyse. Bei der Rauchgasanalyse ist der hohe Anteil an korrosiven HCl-Komponenten zu erwähnen und der noch stärkere Anteil an Kohlenwasserstoffen  $C_nH_m$ , deren Auswirkungen und weitere Reaktionen mit anderen Komponenten unter thermischen Bedingungen nicht abgeschätzt werden können.

Das Brandverhalten von FRNC-Kabeln zeigt deutlich günstigere Werte im Vergleich zu anderen Kabelmaterialien. Nach Bränden von 45 Minuten Dauer waren die Filter in den Luftkanälen nicht in ihrer Funktionsweise eingeschränkt. Ebenso war die meßbare Aerosolablagerung im Luftkanal als gering einzustufen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Aerosolausbreitung und Ablagerung in Luftkanälen durch eine Vielzahl von Parametern beeinflußt werden kann. Wichtig ist hierbei der zeitliche wie örtliche Temperaturverlauf längs des Luftkanals sowie die Länge, die Anzahl der Umlenkungen, der Querschnitt des Luftkanals und Einflüsse durch das Filterverhalten auf die Strömungsverhältnisse. Diese Parameter wirken sich unter Berücksichtigung von Taupunktunterschreitungen (Tropfenkondensation) auf das Ablagerungsverhalten von Aerosolen aus. Deshalb können die durchgeführten Versuche nur als orientierende Versuche gewertet werden, deren Ergebnisse tendenzielle Aussagen für die im Kernkraftwerk vorliegenden Lüftungstechnischen Verhältnisse erlauben.

Die Erdbebenversuche lassen den Schluß zu, daß die geprüften Brandschutzeinrichtungen alle in der Bundesrepublik Deutschland real zu erwartenden Erdbeben schadlos überstehen, sofern die Einbaubedingungen denen im Versuch entsprechen. Hinsichtlich der passiven Brandschutzeinrichtungen wurde nur der in neueren Kernkraftwerken übliche Fall des Einbaus in relativ starren Stahlbetonwänden betrachtet. Es ist nicht auszuschließen, daß sich die gleichen Bauteile bei anderen Einbaubedingungen - z.B. in Mauerwerkswänden oder leichten Trennwänden bzw. Feuerschutzklappen in Lüftungskanälen außerhalb von Wänden - ungünstiger verhalten. Insbesondere könnten größere Verformungen zu einer Gefährdung der Integrität oder zu Fehlfunktionen führen. Hier wäre es sicher nützlich, Vergleichsversuche mit veränderten Einbaubedingungen durchzuführen.

Aufgrund der beobachteten Antwortbeschleunigungen ist es möglich, die Beanspruchungen der Brandschutzeinrichtungen bei Erdbeben abzuschätzen. Dies könnte die Basis für eine künftig gezielte Dimensionierung besonders gefährdeter Punkte, wie z.B. der Achsen von Feuerschutzklappen oder der Befestigungen von Einbauten in Meldeschränken, sein. Damit ließe sich die Erdbebensicherheit für Anwendungen in ausgesprochenen Erdbebengebieten noch weiter steigern.

Die Diskussion über die Lastfallkombination Brand und Erdbeben dürfte durch die Ergebnisse der Erdbebenversuche versachlicht werden. Hier hat sich gezeigt, daß nicht nur, wie in KTA 2101.1 gefordert, kleinere Erdbeben ertragen werden, sondern sogar ein Mehrfaches der für die meisten deutschen Standorte definierten Sicherheitserdbeben. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen einem Erdbeben und dem Versagen von Brandschutzeinrichtungen der im Versuch getesteten Art im Anforderungsfall kann somit praktisch ausgeschlossen werden.

### 7.3 Brandgefahrenanalyse für ein Kernkraftwerk

Die erarbeitete Methodik der Brandgefahrenanalyse wurde mit Erfolg auf eine Referenzanlage angewendet, für die wesentliche Informationen über brandschutztechnische Gegebenheiten aus einer früheren Bestandsaufnahme /ABK 81/ bereits vorlagen. Die erzielten Ergebnisse erscheinen - trotz mancher Unzulänglichkeiten der Eingangsdaten - in sich konsistent und lassen Aussagen über die Brandgefahr ohne weiteres zu.

Für eine genauere Analyse der brandspezifischen Ereignisabläufe sind detaillierte Eingangsdaten erforderlich, deren Beschaffung zum Teil recht mühsam und zeitraubend ist. An einigen Stellen konnten daher vorerst nur begründete Schätzwerte eingesetzt werden. Die hieraus resultierenden Schätzunsicherheiten der Rechenergebnisse lassen sich mit Hilfe der für alle Einflußgrößen ermittelten Wichtungsfaktoren bewerten; vornehmlich diejenigen Daten sind künftig besser abzusichern, die ein größeres Gewicht haben. Die Vorgehensweise bei der Erfassung der brandspezifischen und systemspezifischen Randbedingungen in den Kraftwerksgebäuden hat sich im wesentlichen bewährt. Von den brandspezifischen Randbedingungen sind die Ventilationsverhältnisse mit ihren mög-

lichen Änderungen während des Brandes von besonderer Bedeutung. Bei den vorhandenen aktiven Brandschutzmaßnahmen sind die Einsatzbedingungen, z.B. Auslösezeitpunkt und voraussichtliche Dauer bis zum Wirksamwerden, zu klären. Im Rahmen der sicherheitstechnischen Bewertung erwies sich die Zuordnung der elektrischen Einrichtungen (insbesondere der Kabelverlegung) zu den redundanten Komponenten und Sicherheitssystemen zum Teil als schwierig, insbesondere im Reaktorgebäude.

Die zu Vergleichszwecken durchgeführten vereinfachten und genaueren Ereignisablaufanalysen haben ergeben, daß die Aussagekraft der abgekürzten Rechnungen begrenzt ist. Wenn in der abgekürzten Rechnung sowohl die brandbedingten Ausfälle von Brandschutzmaßnahmen und Komponenten als auch die gegenseitigen Abhängigkeiten der Ausfälle konservativ berücksichtigt werden, können für Risikobetrachtungen auf der sicheren Seite liegende Ausfallhäufigkeiten von Sicherheitssystemen ermittelt werden. Weitergehende Informationen, insbesondere zum Gewicht der einzelnen Einflußgrößen und ihrer Abhängigkeiten - wie sie in der genaueren Rechnung gewonnen werden -, sind jedoch nicht zu erhalten. In einfachen Fällen können begrenzte Aussagen durch Variationsrechnungen gewonnen werden. Somit ist die abgekürzte Rechnung als Hilfsmittel für die Optimierung von Maßnahmen wenig geeignet.

Mit der detaillierten Ereignisablaufanalyse konnten die Wirksamkeit der in neueren deutschen Kernkraftwerken durchgeführten Brandschutzmaßnahmen bewertet, relative Schwachstellen im Brandschutzkonzept eindeutig identifiziert und die effektivsten Möglichkeiten zur Beseitigung aufgezeigt werden. Wie im nachfolgenden Abschnitt diskutiert wird, sind diese durchweg mit geringen Mehrkosten verbunden, mindern jedoch entscheidend die Häufigkeit der aufgezeigten Auswirkungen eines Brandes im Kernkraftwerk.

Neben den Erkenntnissen, die zur Optimierung des Brandschutzes aus der Brandgefahrenanalyse gewonnen wurden, zeigen die Ergebnisse dieser Analyse klar, daß die Sicherheit des Kernkraftwerkes auch hinsichtlich möglicher Brandereignisse nicht gefährdet ist.

Alle untersuchten Ereignisabläufe, die einen brandbedingten Ausfall von sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteilen beinhalten, führen nicht

zu unkontrollierten Anlagenzuständen; es stehen vom Brand nicht betroffene Teile des Sicherheitssystems für die Beherrschung des Ereignisses zur Verfügung. Die ermittelten Häufigkeiten für brandbedingte Ausfälle von sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteilen sind in den relevanten Fällen entweder kleiner als vergleichbare Ausfallhäufigkeiten aufgrund sonstiger anlageninterner Ausfallmöglichkeiten oder liegen in der gleichen Größenordnung.

Als relativ hoch - im Vergleich zu den anderen untersuchten Ereignisablaufpfaden und zu anderen Störfallmöglichkeiten (z.B. kleines Leck) - muß die ermittelte Eintrittshäufigkeit für ein Schadensfeuer im Bereich der Abfallbehandlung im Reaktorhilfsanlagegebäude angesehen werden. Bevor man allerdings für diesen Raumbereich verbesserte Brandschutzmaßnahmen aus sicherheitstechnischer Sicht in Betracht zieht, sollte zunächst geprüft werden, ob die radiologischen Auswirkungen eines solchen Schadenfeuers Verbesserungen notwendig erscheinen lassen. Die radiologischen Auswirkungen dieses Brandereignisses wurden in der vorliegenden Studie nicht untersucht.

#### 7.4 Optimierung des Brandschutzes

Die Optimierungsansätze in der vorliegenden Studie basieren auf einer pragmatischen Vorgehensweise, da theoretisch anspruchsvollere Kosten-Nutzen-Optimierungen wegen fehlender Daten und zu großem Aufwand derzeit nicht realisierbar sind. Wesentliche Informationsquelle für die raumweise erarbeiteten Verbesserungsvorschläge sind die detaillierten Brandereignisablaufanalysen, durch die maßgebende Versagenspfade und wichtige Einflußgrößen erkannt werden. Die Verbesserungen können gezielt in der Weise vorgenommen werden, daß relative Schwachstellen im Brandschutzkonzept (d.h. relativ hohe Häufigkeiten unerwünschter Konsequenzen) durch Modifikation oder gegebenenfalls Ergänzung der maßgebenden Brandschutzmaßnahmen am effektivsten beseitigt werden.

Ansätze für eine Optimierung ergeben sich vor allem bei den aktiven Brandschutzmaßnahmen. Hierzu zählen mit gewisser Wahrscheinlichkeit offenstehende Türen, die durch zusätzliche Ventilation zu einem heftigeren Brandverlauf führen; dem kann durch organisatorische Maßnah-

men oder Einbau zuverlässiger Feststellanlagen vorgebeugt werden. Ein günstig auf den Brandverlauf wirkender rechtzeitiger Lüftungsabschluß im Brandraum scheitert an der Unzuverlässigkeit der Schmelzlotauslösung von Brandschutzklappen in Zuluftkanälen sowie der manuellen Auslösung vor Ort. Zuverlässigere Auslösemechanismen sind hier zu fordern, wenn dies zur Beherrschung von Bränden im Hinblick auf die Reaktorsicherheit erforderlich ist. Die manuelle Brandbekämpfung ist in den meisten Fällen wegen der Verzugszeiten bis zum Einsatz vor Ort infolge der bis dahin bereits brandbedingt stark angestiegenen Raumtemperatur nicht einsetzbar. Auch manuell vor Ort oder mit Zeitverzug von der Warte ausgelöste stationäre Löschanlagen verhindern die Brandentwicklung nicht rechtzeitig, so daß Komponentenausfälle, Rauchausbreitung und gegebenenfalls die Brandübertragung in Nachbarbereiche die Folge sind. Dies kann durch frühzeitige Auslösung, z.B. unmittelbar nach Brandmeldung von der Warte, oder durch automatische Auslösung vermieden werden.

Die passiven Brandschutzmaßnahmen in den untersuchten Raumbereichen erscheinen - soweit sie konsequent durchgeführt wurden - den erwarteten Brandverläufen angemessen.

Insgesamt kann die Brandsicherheit in den meisten Fällen durch vergleichsweise einfache und weitgehend kostenneutrale Modifikationen im Brandschutzkonzept erhöht und gleichzeitig der Personen- und Sachschutz verbessert werden. Hier stehen demnach Anlagensicherheit und Personenschutz nicht im Widerspruch. Bei der Planung neuerer Anlagen dürften die hier aufgezeigten Möglichkeiten der Brandgefahrenanalyse von Interesse sein, um von vornherein optimale Brandschutzkonzepte zu finden. Längerfristig erscheinen auch umfassendere Kosten-Nutzen-Optimierungen realisierbar, wenn nach und nach die hierzu erforderliche Datenbasis geschaffen wird.

## 8. ÜBERTRAGBARKEIT DER ERGEBNISSE

### 8.1 Kriterien für die Übertragbarkeit

Im folgenden wird untersucht, inwieweit die vorliegenden Erkenntnisse und Ergebnisse aus den Grundlagenuntersuchungen und den anlagen-spezifischen Untersuchungen auf andere Kernkraftwerkstypen, wie Siedewasserreaktor (SWR), Hochtemperaturreaktor (HTR) und Schneller Natriumgekühlter Reaktor (SNR), sowie auf ältere bzw. neuere Anlagenkonzepte im Vergleich zur untersuchten Referenzanlage übertragbar sind. Dabei interessiert vor allem die Frage, in welcher Form und in welchem Umfang Möglichkeiten gesehen werden, die auf eine Referenzanlage exemplarisch angewandten Methoden und Verfahren sowie die in diesem Zusammenhang erzielten Daten und Zahlenwerte auf andere Kernkraftwerke zu übertragen.

Ausgangspunkt einer solchen Untersuchung ist die Darlegung der Ausgangssituation im Hinblick auf die Allgemeinheit der anstehenden Probleme und Fragestellungen. Im Vordergrund stehen hierbei naturgemäß Fragen der erforderlichen nuklearen Sicherheit der Anlagen, Anlagenbereiche und Anlagenräume. Soweit die Anforderungen an unterschiedlichen Anlagen untereinander äquivalent sind und gewissermaßen zu gleichartigen Anforderungen führen, ist eine wesentliche Grundvoraussetzung der Übertragbarkeit erfüllt.

Die grundlegenden sicherheitstechnischen Anforderungen an Kernkraftwerke beinhalten u.a., daß die Anlagen so beschaffen sein müssen, daß sie bei Störfällen - das kann auch ein Brand sein - jederzeit sicher abgeschaltet und im abgeschalteten Zustand gehalten werden können, die Nachwärme sicher abgeführt werden kann und die Strahlenexposition des Personals und der Umgebung unterhalb zulässiger Grenzen bleibt.

Aus Risikogesichtspunkten kommt der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit sicherheitstechnisch wichtiger Anlagenteile im Brandfall eine besondere Bedeutung zu. Demgegenüber sind unmittelbare Brandeinwirkungen auf radioaktive Stoffe mit der Möglichkeit einer Freisetzung bei einem Kernkraftwerk aufgrund seiner Art und Nutzung hinsichtlich des Gefährdungspotentials von sekundärer Bedeutung.

Diese Feststellung gilt grundsätzlich für alle Kernkraftwerke. Bei SNR-Anlagen kommt allerdings aufgrund des großen Inventars radioaktiven Natriums dem Aspekt der unmittelbaren brandbedingten Freisetzung zumindest tendenziell eine größere Bedeutung zu. Bei anderen kerntechnischen Anlagen, wie z.B. Wiederaufarbeitungsanlagen oder Brennstofffabriken, kann sich das Gewicht dieser beiden Aspekte - Funktionsfähigkeit wichtiger Anlagenteile, Brandeinwirkungen auf radioaktive Stoffe - teilweise völlig verlagern.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Übertragbarkeit wäre eine Identität der Szenarien. Hierunter ist zu verstehen, daß eine bauliche, anlagentechnische und betriebliche Vergleichbarkeit der Anlagenbereiche oder -räume gegeben ist. Dazu gehören u.a. folgende allgemeine Parameter und Kenngrößen:

- Abmessung und Nutzung der Bereiche/Räume,
- bautechnischer Brandschutz der Bereiche/Räume,
- anlagentechnischer Brandschutz der Bereiche/Räume,
- systemtechnische Verknüpfung mit anderen Bereichen.

Bei gleichen Bedingungen ist anzunehmen, daß sowohl für die statistisch probabilistischen Daten, wie Eintrittshäufigkeiten, Ausbreitungswahrscheinlichkeiten und relevante Ereignisabläufe als auch für die physikalischen Auswirkungen des Brandes, die Übertragbarkeit gegeben ist. Eine so weitgehende Identität der Szenarien, die alle getroffenen baulichen, anlagentechnischen und betrieblichen Maßnahmen miteinander verknüpft, ist naturgemäß für ganze Anlagen kaum gegeben. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß aufgrund weitgehender Identitäten in den grundsätzlichen Anforderungen häufig zumindest bereichsweise vergleichbare Lösungen angestrebt und realisiert werden. Bezüglich der Übertragung statistischer Eingangsdaten bedeutet dies, daß pauschale oder globale Zahlenwerte und Annahmen kaum zu verwenden, raumspezifische Daten im allgemeinen jedoch durchaus brauchbar sind.

Die Frage der Übertragbarkeit umfaßt jedoch nicht nur den bestimmungsgemäßen Betrieb von Anlagen, sondern ist grundsätzlich auch unter dem Gesichtspunkt der Revisionsphase und Betriebsunterbrechungen zu beleuchten. Dabei ergeben sich besondere Schwierigkeiten, weil die möglicherweise vorhandene Vergleichbarkeit der Szenarien unter diesen

spezifischen Bedingungen unter Umständen nicht mehr gegeben ist. Entscheidend ist hier, welche Phase des Anlagenzustandes auslegungsbestimmend ist. In bezug auf die nukleare Sicherheit ist dies im allgemeinen der bestimmungsgemäße Betrieb. Deshalb wird der Gesichtspunkt Revisionsphase/Betriebsunterbrechung hier nicht weiter berücksichtigt.

## 8.2 Übertragbarkeit der angewandten Methoden und der Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen

Die Übertragung der hier angewandten Methoden und Verfahren bedarf einer differenzierten Betrachtung. Aufgrund der allgemeinen Zielsetzung dieser Studie, nämlich Brandschutzmaßnahmen an einer Referenzanlage zu analysieren und zu optimieren, war die Aufgabenstellung von vornherein beschränkt auf einen bestimmten Anlagentyp. Die in Abschnitt 5.8 vorgelegten Endergebnisse (detailliert im Fachband 3) sind daher ebenfalls nur partiell auf andere Anlagen übertragbar, wobei die Möglichkeiten einer Übertragung auf DWR-Anlagen neuerer Bauart naturgemäß am ehesten gegeben sind.

Die in Abschnitt 3.3 und im Fachband 1, Teil A beschriebenen und in den anlagenspezifischen Analysen angewandten Rechenverfahren sind im allgemeinen übertragbar, wobei im Hinblick auf spezifische physikalische Randbedingungen Erweiterungen und Umformulierungen in den beschriebenen Rechenmodellen erforderlich werden könnten. Dieses ist mit Sicherheit bei der Durchführung von Containmentberechnungen der Fall, ebenso sind naturgemäß die experimentell ermittelten Brandkenngrößen (Fachband 2) nicht auf beliebige Brandabläufe übertragbar. Die allgemeine Anwendbarkeit grundsätzlich geeigneter Wärmebilanzmodelle ist somit nur begrenzt durch die vorab möglicherweise erforderlichen umfangreichen theoretischen oder experimentellen Arbeiten.

Ebenso dürfte sich ein Großteil der in Abschnitt 3.5 aufgezeigten Daten zur Ausfallwahrscheinlichkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen (Fachband 1, Teil B) übertragen lassen, zumindest soweit vergleichbare Einrichtungen zur Anwendung kommen. Schwierigkeiten auf diesem Gebiet bestehen vor allem noch im Bereich der Bewertung der Zuverlässigkeit menschl-

cher Handlungen sowie bei der Inrechnungstellung günstiger Zuverlässigkeitswerte infolge eines erhöhten und höherwertigen Wartungsaufwandes.

Die im Fachband 1, Teil C beschriebene Methodik zur Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit passiver Brandschutzeinrichtungen, dürfte sich ebenfalls weitestgehend übertragen lassen. Dies gilt zumindest für den Bereich der genormten Bauteile bis F120. Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist mit den Bauteiltemperaturen verknüpft und somit eine Funktion der Zeit; infolgedessen wird auch kein bestimmter Wert angegeben, so daß in jedem individuellen Fall ein von der Branddauer abhängiger Wert berechnet werden kann. Eine Übertragbarkeit ist aber immer dann möglich, wenn die Brandwirkungen und das Bauteilversagen einer theoretischen Behandlung zugänglich sind.

Die in Teil D des Fachbandes 1 beschriebene Methodik der Brandgefahrenanalyse läßt sich prinzipiell auch auf andere Typen von Kernkraftwerken übertragen. Dabei sind unter Umständen jedoch erhebliche Änderungen, z.B. bei der Zusammenstellung der Ereignisabläufe und Bewertung der systemtechnischen Auswirkungen, erforderlich. Ebenso ist selbstverständlich, daß auch die hier getroffene Raumauswahl allerhöchstens noch für neuere DWR-Anlagen gelten kann; bezüglich der angewandten Methodik ergeben sich daraus allerdings keine Einschränkungen.

Zur Quantifizierung von Brandereignisabläufen wurde im Fachband 1, Teil E eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, die Zeitabhängigkeit von Ereignisabläufen beim Brand exakt zu berücksichtigen. Die Methode erlaubt die Durchführung von Brandgefahrenanalysen in einfacher und konsistenter Weise, so daß sich eine Übertragung geradezu anbietet.

### 8.3 Brandschutzkonzepte in älteren und neueren Anlagen

Der Brandschutz in Kernkraftwerken hat im Verlauf der technischen Entwicklung der Anlagen, insbesondere zu höheren Leistungen, zunehmende Bedeutung erlangt. Daraus ergeben sich konzeptionelle Unterschiede auch in den deutschen Kernkraftwerksgenerationen. Gegenüber amerikanischen

Kernkraftwerken, wo die brandschutztechnische Entwicklung den schnellen Einsatz aktiver Maßnahmen zur Brandbekämpfung - mit besonderen Anforderungen an deren Zuverlässigkeit - bevorzugte, nutzen die Brandschutzkonzepte in deutschen Kernkraftwerken den redundanten Aufbau der Sicherheitseinrichtungen und trennten im Verlauf ihrer Entwicklung diese Redundanzen zunehmend durch geeignete passive bauliche Brandschutzmaßnahmen.

Bei den in Betrieb befindlichen älteren Anlagen wurden die Brandschutzmaßnahmen zwischenzeitlich erheblich verbessert. Dabei kam aufgrund der im allgemeinen nicht veränderbaren baulichen Gegebenheiten den aktiven Brandschutzmaßnahmen (frühzeitige Branderkennung und Bekämpfung) bei diesen Anlagen eine besondere Bedeutung zu.

Für die in der Bundesrepublik Deutschland gebauten, im Bau oder in der Planung befindlichen Kernkraftwerke lassen sich heute grob vier Entwicklungsstufen des Brandschutzes aufzeigen, die durch folgende Merkmale gekennzeichnet sind:

- Stufe I (z.B. VAK, KKB, KKS, KWO)
  - Orientierung an konventionellen Brandschutzanforderungen,
  - keine brandschutztechnische Trennung von redundanten Sicherheitseinrichtungen,
  - besondere Vorkehrungen zur Kompensation der fehlenden bautechnischen Brandschutzmaßnahmen mit Hilfe aktiver Brandschutzmaßnahmen, insbesondere stationärer Löschanlagen.
  
- Stufe II (z.B. KKP-1, KKI-1, KKU, Biblis-B)
  - Berücksichtigung konventioneller Brandschutzanforderungen soweit wie möglich,
  - teilweise brandschutztechnische Trennung von redundanten Sicherheitseinrichtungen (z.B. im Schaltanlagegebäude sind jeweils 2 von 4 Redundanzen zusammen in einem Brandabschnitt angeordnet),
  - Abschottung von einzelnen Raumbereichen mit hoher Brandlast,

- zusätzlich zu den Vorkehrungen zur manuellen Brandbekämpfung sind in Raumbereichen mit hoher Brandlast oder fehlender Redundanztrennung im allgemeinen stationäre Löschanlagen vorgesehen.
- Stufe III (z.B. KKG, KRB-B und C, KKP-II, KWG, KBR)
  - Berücksichtigung konventioneller Brandschutzanforderungen soweit wie möglich,
  - grundsätzlich vollständige brandschutztechnische Trennung aller redundanten Sicherheitseinrichtungen,
  - bauliche Abschottung grundsätzlich feuerbeständig (F90, T90, K90),
  - Räume mit hoher Brandlast bzw. schutzbedürftige Anlagenbereiche sind mit stationären Löschanlagen versehen.
- Stufe IV (z.B. KKI-2, KKE)

Zusätzlich zu den Merkmalen der Stufe III werden nicht direkt erfüllbare konventionelle Brandschutzanforderungen durch andere Maßnahmen kompensiert, z. B.:

  - zusätzliche Personennotschleuse im Sicherheitsbehälter und Ausbildung von gesicherten Fluren (F90) im Hilfsanlagegebäude;
  - Einsatz spezieller halogenfreier Kabel (FRNC-Kabel) innerhalb des Sicherheitsbehälters,
  - erhebliche Reduzierung der Ölmengen im Sicherheitsbehälter durch eine integrierte Ölversorgung der Hauptkühlmittelpumpen,
  - Abschottung von Treppenträumen und zusätzlichen Schleusenstauräumen im Sicherheitsbehälter mit Belüftung im Brandfall.

Sieht man davon ab, daß der Einsatz halogenfreier Sonderkabel und die integrierte Ölversorgung der Hauptkühlmittelpumpen im Sicherheitsbehälter auch aus sicherheitstechnischer Sicht von Vorteil ist, zielen die zusätzlichen Merkmale der Stufe IV darauf ab, den Schutz des Betriebspersonals zu verbessern. Zwischenzeitlich wurden aber auch bei anderen Anlagen Verbesserungen hinsichtlich des Personenschutzes vorgenommen, insbesondere sind hier die Regelungen zum Offenhalten der Personenschleuse in der Revisionsphase der Anlage zu nennen.

Die untersuchte Referenzanlage ist den Merkmalen der Stufe III zuzuordnen. Nachfolgend wird aufgezeigt, inwieweit die Ergebnisse der anlagenspezifischen Analysen der Referenzanlage auf andere Anlagen übertragbar sind.

#### 8.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse der anlagenspezifischen Analysen

##### 8.4.1 Brandgefahrenanalyse

Die vorgeschlagene Methodik der Brandgefahrenanalyse ist, wie schon erwähnt, im Prinzip auf jede Anlage anwendbar. Auch manche der benutzten Eingangsdaten können bei gleichen oder vergleichbaren Randbedingungen benutzt werden. Die Versagensgrenzen von Komponenten und Systemen dürften gleich oder zumindest in gleicher Weise ermittelbar sein.

Die brandschutztechnischen und sicherheitstechnischen Randbedingungen sind in jedem Einzelfall neu zu ermitteln. Dazu ist eine Bestandsaufnahme der zu untersuchenden Anlage sowohl nach Unterlagen als auch vor Ort erforderlich. Der notwendige Detaillierungsgrad der Informationen kann aufgrund der gewonnenen Erfahrungen besser abgestuft werden, als es in der vorliegenden Studie möglich war. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die in Abschnitt 7.3 zusammengefaßten Randbedingungen mit dem größten Einfluß auf die Ergebnisse zu richten.

Aufgrund der durchgeführten Bestandsaufnahme ist selbstverständlich auch die Raumauswahl und die Ermittlung der brandspezifischen Ereignisablaufdiagramme anlagenspezifisch vorzunehmen. Hierbei können die in dieser Studie verwendeten Kriterien zugrunde gelegt werden.

Die Brandwirkungen hängen sehr stark von den brandschutztechnischen Randbedingungen ab. Die Übertragung der für die Referenzanlage ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufe auf ähnliche Raumbereiche sollte nur nach sorgfältiger Überprüfung aller Randbedingungen erfolgen, insbesondere hinsichtlich Geometrie, Ventilation und Brandlast.

Die ermittelten Häufigkeiten der Auswirkungen eines Brandes in den untersuchten Räumen oder Raumbereichen sowie die Hinweise auf mögliche Konsequenzen für Personen- und Sachschutz gelten nur für die Referenzanlage und können generell nicht übertragen werden. Quantitative Aussagen zur Übertragbarkeit bedürfen rechnerischen Überprüfungen. Nachfolgend wird für die untersuchten Räume bzw. Raumbereiche diskutiert, inwieweit die ermittelten Zahlenwerte zumindest von der Größenordnung her gültig sein könnten oder wie sie sich gegebenenfalls tendenziell verändern würden und welche Teilergebnisse generell übertragbar sind.

- Ölbehälterraum im Sicherheitsbehälter (A)

Die Anordnung der Ölbehälterräume ist bei der Mehrzahl der Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor (Biblis-B, KKW, GKN-I, KBR, KWG, KKP-II, KKG) ähnlich derjenigen bei der Referenzanlage. Bei den zu berücksichtigenden Brandlasten und bei den passiven und aktiven Brandschutzmaßnahmen gibt es bei diesen Anlagen zwar teilweise Unterschiede zur Referenzanlage, die aufgezeigten relevanten Einflußgrößen (Ventilation, Auslösung der stationären Löschanlagen) kommen aber auch in diesen Fällen zum Tragen. Der ermittelte Häufigkeitswert dürfte deshalb von der Größenordnung her auch für brandbedingte Auswirkungen bei den genannten Anlagen gelten. Die systemtechnischen Auswirkungen sind aber aufgrund anderer räumlicher Anordnungen von Systemen und Komponenten möglicherweise sehr unterschiedlich. Bei einigen älteren Anlagen und bei Anlagen mit Siedewasserreaktoren sind die Gegebenheiten wesentlich anders (z.B. KKS: Ölbehälterräume im Reaktorgebäuderingraum; KWO: ein größerer Ölbehälter mit CO<sub>2</sub>-Löschanlage), so daß für solche Anlagen keine Aussagen gemacht werden können. Bei der neuesten Baulinie des DWR 1300 (z.B. KKI-2, KKE) gibt es keine Ölbehälterräume mehr, da die Hauptkühlmittelpumpen bei diesen Anlagen mit integrierten Ölversorgungen ausgestattet sind; deshalb entfällt hier diese Betrachtung.

- Bereich der Hauptkühlmittelpumpen (B)

Sieht man von der neuesten Baulinie des DWR 1300 ab, bei der aufgrund der integrierten Ölversorgung der Hauptkühlmittelpumpen we-

sentlich günstigere Randbedingungen als im untersuchten Fall gelten (geringere Ölleckagemöglichkeiten, niedrigerer Ölsystemdruck), sind für die Mehrzahl der anderen DWR-Anlagen (z.B. Biblis-B, KKV, KBR, KWG, KKG, KKP-II) die Gegebenheiten ähnlich. Deshalb sind die Ergebnisse auf diese Anlagen weitestgehend übertragbar. Bei DWR-Anlagen kleinerer Leistung (< 1200 MWe, z.B. KKS, KWO, GKN-I) können aufgrund anderer baulicher Gegebenheiten (Raumaufteilung, Abmessungen, Lüftung) andere Raumtemperatur-Zeitverläufe möglich werden, so daß für diese Anlagen die ermittelten Brandwirkungen ohne weitere Prüfung nicht übertragbar sind.

Bei SWR-Anlagen gibt es zwar auch ölversorgte Pumpen im Sicherheitsbehälter, die anlagentechnisch und brandschutztechnisch völlig unterschiedlichen Gegebenheiten lassen aber eine Übertragung der Ergebnisse nicht zu.

- Bereich der Kabeldurchführung im Sicherheitsbehälter (C)

Bei allen DWR-Anlagen mit einer brandschutztechnischen Trennung redundanter Anlagenteile (Stufen II, III, IV nach Abschnitt 8.3) stellt sich prinzipiell die gleiche Frage wie in den vorliegenden Untersuchungen: Kann es beim Brand einer Kabelredundanz zur Brandübertragung auf die Nachbarredundanz kommen? Die örtlichen Kabelbelegungen und die vorgesehenen Brandbekämpfungsmaßnahmen sind in den einzelnen Anlagen zwar unterschiedlich, die aufgezeigten relevanten Einflußgrößen dürften aber auch hier für die Ergebnisse bestimmend sein. Deshalb ist anzunehmen, daß für diese Anlagen grundsätzlich ähnliche Häufigkeitswerte für die Brandübertragung gelten, die für den Fall fehlender stationärer Löschanlagen allerdings ungünstiger werden können.

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Schutzwirkung von Dämmschichtbildnern gelten generell. Das heißt, unter ungünstigen Randbedingungen (Wärmestau) verhindern Dämmschichtbildner eine Brandübertragung nicht.

Bei älteren DWR-Anlagen ohne eine brandschutztechnische Trennung redundanter Anlagenteile (Stufe I, teilweise Stufe II nach Abschnitt 8.3) und bei SWR-Anlagen sind die Gegebenheiten (räumliche Anordnung

der Kabel und ihre Zuordnung zu Systemen und Komponenten) wesentlich anders; eine Übertragung der Ergebnisse auf diese Anlagen kann nicht erfolgen.

- Kabelschacht mit angrenzendem Flutbehälterraum (D)

Die relevanten Ereignisablaufpfade und die möglichen Auswirkungen werden durch die speziellen Gegebenheiten der Referenzanlage bestimmt; die Ergebnisse sind deshalb ohne detaillierte Prüfung nicht übertragbar. Die ermittelten Brandwirkungen sind bei nicht wesentlich abweichenden Brandlasten und Lüftungsbedingungen auf Kabelschächte ähnlicher Bauart übertragbar.

- Kabelverteilungen im Ringraum (E1, E2)

Es gelten die Aussagen zum Fall C prinzipiell auch für diese Raumbereiche. Aufgrund verbesserter Brandschutzmaßnahmen in diesen Bereichen sind bei DWR-Anlagen der neuesten Baulinie günstigere Ergebnisse zu erwarten.

- Bereich Feststoffpresse/Lager für radioaktive Abfälle (F)

Vergleichbare Einrichtungen und Lager gibt es in jedem Kernkraftwerk. Obwohl die räumlichen Gegebenheiten, die Brandlast und die Lüftungstechnischen Randbedingungen in anderen Anlagen unterschiedlich sein können, sind die vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen nicht wesentlich anders als bei der Referenzanlage. Deshalb wird sich bei anderen Anlagen kein wesentlich anderer Ereignisablauf und auch keine wesentlich andere Häufigkeit für ein Schadensfeuer in diesem Bereich ergeben.

- Kabelraum unterhalb der Warte (G)

Das betrachtete Szenario ist auf Kernkraftwerke (DWR oder SWR), bei denen die redundanten elektrotechnischen Einrichtungen im Schaltanlagegebäude auf vier brandschutztechnisch getrennte Gebäudescheiben aufgeteilt sind (Stufe III, IV nach Abschnitt 8.3), weitgehend übertragbar. Besonderheiten bei der Steuerung von Lüftungs-, Rauch- und Wärmeabfuhr-Anlagen in verschiedenen Kernkraftwerken könnten bei den genaueren Rechnungen zu einem anderen

zeitlichen Ereignisablauf führen und gegebenenfalls die Ergebnisse etwas verändern. Sie dürften für die Anlagen günstiger werden, bei denen ortsfeste Löschanlagen zum Einsatz kommen.

Die Aussagen zum Einfluß der RWA-Anlagen auf die Brandwirkung (Temperatur, Verqualmung) gelten generell. Der Nutzen solcher Anlagen hinsichtlich Brandbekämpfung, Personenschutz und Sachschutz kann aber nur im Einzelfall beurteilt werden.

Bei anderen, insbesondere älteren Kernkraftwerken (Stufe I, II) sind aus sicherheitstechnischer Sicht andere Raumbereiche (z.B. Rangierverteilterraum) des Schaltanlagegebäudes von größerer Bedeutung. Vergleichbare Raumbereiche gibt es bei der Referenzanlage nicht.

- Ölbehälterraum im Notstromdieselgebäude (H)

Die ermittelten Häufigkeitswerte werden durch die speziellen Gegebenheiten der Referenzanlage bestimmt, so daß sie ohne detaillierte Prüfung nicht übertragen werden können. Allgemein gültig ist die Feststellung, daß bei einem Ölbrand mit Behälterversagen benachbarte Brandabschnitte in diesem Gebäude ebenfalls betroffen sind. Hinsichtlich der Relevanz dieses Ereignisses gilt für alle Kernkraftwerke, daß nur die Überlagerung mit einer vom Brand unabhängigen, zufälligen Anforderung des Notstromsystems von Interesse ist. Bei Kernkraftwerken mit erdverlegten Dieselölbehältern kommt das untersuchte Szenario nicht in Betracht.

- Kabelkanal zwischen Reaktorgebäude und Notspeisegebäude (I)

Einen vergleichbaren Kabelkanal mit gleicher sicherheitstechnischer Bedeutung gibt es nur bei DWR-Anlagen mit Notspeisegebäude (z.B. KWG, KKG, KBR, KKP-II, KKE). Aber auch bei diesen Anlagen können die Ergebnisse nicht ohne nähere Prüfung übertragen werden, da andere Randbedingungen (z.B. Tür zum Reaktorgebäude statt zum Nebengebäude) gelten können. Die ermittelten Brandwirkungen sind bei nicht wesentlich abweichenden Brandlasten und Lüftungsbedingungen generell auf Kabelkanäle ähnlicher Bauart übertragbar.

#### 8.4.2 Optimierungsansätze

Das hier benutzte pragmatische Vorgehen bei der Erarbeitung von Optimierungsvorschlägen eignet sich auch für andere Anlagen, sofern für diese gemäß Abschnitt 8.5 eine Brandgefahrenanalyse durchgeführt wurde. Alle erforderlichen Informationen liegen dann vor.

Die am Beispiel der ausgewählten Raumbereiche der Referenzanlage aufgezeigten Optimierungsmöglichkeiten sind zum Teil generell gültig. Dies trifft z.B. auf fast alle vorgeschlagenen Verbesserungen der aktiven Brandschutzmaßnahmen zu. Weitergehende Hinweise, wie die optimale Kombination verschiedener zur Diskussion stehender Brandschutzmaßnahmen, mit der z.B. eine obere Grenze der Häufigkeit bestimmter Konsequenzen eingehalten wird, können nur raumspezifisch gewonnen werden.

SCHRIFTTUM

- /ABK 81/ Arbeitsgemeinschaft Brandschutz in Kernkraftwerken:  
Bestandsaufnahme brandschutztechnischer Gegebenheiten, Maßnahmen und Bestimmungen in Kernkraftwerken  
Förderungsvorhaben BMI SR-144, Sept. 1981
- /GAL 80/ Gallucci, R.H.:  
A Methodology For Evaluating The Probability For Fire Loss of Nuclear Power Plant; Safety Functions  
Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1980
- /GRS 80/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit:  
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke. Eine Untersuchung zu dem durch Störfälle in Kernkraftwerken verursachten Risiko - Hauptband -, sowie Fachband 4: Einwirkungen von außen (einschließlich anlageninterner Brände)  
Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn  
Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1980
- /GRS 84/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit:  
Zwischenergebnisse der Phase B der deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, Bericht 84 (in Vorbereitung)
- /KTA 84/ Kerntechnischer Ausschuß:  
Sicherheitstechnische Regel KTA 2101.1: Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 1: Grundsätze des Brandschutzes  
(Gründruck 1984)
- /OLD 74/ Oldekop, W., u.a.:  
Druckwasserreaktoren für Kernkraftwerke,  
Verlag Karl Thiemig, München, 1974

/SAN 79/ Sandia Laboratories:  
Nuclear Power Plant Fire Protection  
- Fire Hazards Analysis -  
SAND 79-0324,  
NUREG/CR-0654, Albuquerque, New Mexico, Sept. 1979

~~/SMI 79/~~ Smidt, D.:  
Reaktorsicherheitstechnik  
Springer Verlag, Berlin,  
Heidelberg, New York, 1979

**Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH**

Schwertnergasse 1  
5000 Köln 1

Forschungsgelände  
8046 Garching

ISBN 3-923875-10-X