



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Fortschrittliche Methoden für eine Brand-PSA



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Fortschrittliche Methoden für eine Brand-PSA

Entwicklung fortschritt-
licher Methoden zur
realitätsnahen Durchführung
anlagenspezifischer
probabilistischer
Brandrisikoanalysen

Eduard Hofer
Marina Röwekamp
Michael Türschmann
et al.

Juli 2003

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrundeliegende F&E-Vorhaben „Entwicklung fortschrittlicher Methoden für eine probabilistische Sicherheitsanalyse, insbesondere der Stufe 2“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Kennzeichen RS 1112 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

**GRS - 190
ISBN 3-931995-58-5**

Deskriptoren:

Brand, Brandmelder, Brandschutz, Brandursache, Datenbank, Datensammlung, Modell, PSA

Kurzfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsvorhabens RS 1112 „Entwicklung von Methoden für eine fortschrittliche probabilistische Sicherheitsanalyse, insbesondere der Stufe 2“ wurden methodologische Weiterentwicklungen durchgeführt, insbesondere für eine möglichst realitätsnahe Durchführung anlagenspezifischer probabilistischer Brandsicherheitsanalysen (PSA-Brand). Der vorliegende Technische Bericht gibt einen Überblick über die in diesem Zusammenhang erarbeiteten Beiträge zur Methodenentwicklung für die Bewertung des übergreifenden auslösenden Ereignisses Brand.

Der erste Arbeitsschritt einer PSA-Brand ist das Auswahlverfahren, auch screening genannt. Zur Auswahl kritischer Raumbereiche als Ausgangspunkt für deren detaillierte Untersuchung im Rahmen von probabilistischen Brandanalysen ist auf der Grundlage umfassender Informationen zu allen brandspezifischen Belangen für alle Räume der zu untersuchenden Gebäude der Anlage eine Auswahlmenge von Räumen zu bestimmen, für welche brandspezifische und probabilistische Detailanalysen durchzuführen sind. Im Rahmen des Forschungsvorhabens RS 1112 wurde eine standardisierte Vorgehensweise zur Durchführung eines solchen Auswahlverfahrens abgeleitet.

Diese Vorgehensweise beinhaltet eine systematisch strukturierte Erfassung von Primärinformationen in einer Datenbank sowie die automatische Berechnung von Raumrangfolgen bzgl. ihrer Brandrelevanz auf der Grundlage dieser Informationen. Die Raumrangfolgen beziehen sich auf die Kenngrößen Brandbelastung, bedingte Eintrittshäufigkeit eines Brandes und Möglichkeiten der Brandausbreitung. Die lokalen Brandeintrittshäufigkeiten werden dabei generisch mittels der Methode von Berry ermittelt. Zur Umsetzung der Methodik und Anwendung für das screening im Rahmen von PSA wurde eine ACCESS-Datenbank erstellt, mit der sowohl die Datenerfassung als auch die Auswertung der Daten vorgenommen werden kann.

Probabilistische Brandrisikoanalysen für Kernkraftwerke erfordern weiterhin Kenntnisse zu lokalen Eintrittshäufigkeiten von Entstehungsbränden. Im vorliegenden Bericht wird auf der Grundlage von verschiedenen international angewandten Methoden zur Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten für die im Auswahlverfahren (screening) ermittelten kritischen Raumbereichen gezeigt, dass eine solche Ermittlung nur mit einem bottom up-Verfahren möglich ist. Eine dementsprechende systematische, standardi-

sierte Vorgehensweise zur Bestimmung anlagenspezifischer Brandeintrittshäufigkeiten in vier Schritten aus qualitativer Analyse, Modellierung, Daten und Quantifizierung wurde abgeleitet.

Bei der Erarbeitung der Vorgehensweise wurde allerdings deutlich, dass sich der Arbeitsschritt Modellierung (Aufstellung einer quantitativen Vorschrift zur Berechnung der Eintrittshäufigkeit) durch die Vielzahl der möglichen brandspezifischen Einflussgrößen und deren Kombinationen nicht durch eine umfassende Methode abdecken lässt. Wie die Modellierung zu erfolgen hat, wird immer anhand der konkreten Raumeigenschaften, anhand der technischen und brandphysikalischen Zusammenhänge und anhand der vorhandenen Datenbasis im Einzelfall entschieden werden müssen.

Im Rahmen der methodischen Weiterentwicklungen zur PSA-Brand wurde für ein deutsches Kernkraftwerk neuester Bauart vom Typ Konvoi am Beispielszenario eines von einem elektrischen Verteilerschrank ausgehenden Kabelbrandes innerhalb des Sicherheitsbehälters erstmalig ein Brandsimulationscode mit den anlagenspezifischen Möglichkeiten der Brandmeldung zur Berechnung von Wahrscheinlichkeiten von brandbedingten Ausfällen gekoppelt. Die dazu vorliegende Studie ermittelt erstmals die Wahrscheinlichkeit von Brandfolgen aus einer Klasse von Brandereignissen mit Hilfe der probabilistischen Dynamik zusammen mit Unsicherheits- und Sensitivitätsausagen.

Dazu werden bei der Anwendung eines deterministischen Rechenmodells, bestehend aus dem Dynamikmodell für Brandsimulationsrechnungen mit einem entsprechenden Rechencode und einem Gegenmaßnahmenmodell, sowohl Stochastikeinflüsse (als aleatorische Unsicherheiten bezeichnet) als auch Kenntnisstandunsicherheiten (so genannte epistemische Unsicherheiten) berücksichtigt. Auf diese Weise werden Wahrscheinlichkeitsaussagen einschließlich von Unsicherheitsangaben zur weiteren Verarbeitung in der PSA zur Verfügung gestellt.

Mit diesem Vorgehen kann beispielsweise die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der eine, für bestimmte sicherheitstechnisch relevante Einrichtungen als kritisch angenommene Temperatur über eine Mindestzeitdauer in einem bestimmten Raumbe-
reich ansteht. Weiterhin lässt sich bestimmen, wie gut diese Wahrscheinlichkeit allein aufgrund der Angaben zu Parameter- und Modellunsicherheiten in der dynamischen Rechnung und in der stochastischen Modellierung ist. Die darüber hinaus ermittelten

Sensitivitätsmaße geben an, woher die wichtigsten Beiträge zur Unsicherheit der ermittelten Wahrscheinlichkeitswerte kommen.

Sofern erforderlich, lässt sich somit die Aussagekraft der Ergebnisse der PSA zu Brand nach einer solchen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse erhöhen. Die Ergebnisse derartiger Untersuchungen repräsentieren zudem auch einen Maßstab für die Aussagekraft der PSA-Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die unsicheren Parameter, deren Kenntnisstand sich nicht bzw. nicht ohne weiteres verbessern lässt.

Abstract

In the frame of the research project RS 1112 “Development of Methods for a Recent Probabilistic Safety Analysis, Particularly Level 2” funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), advanced methods, in particular for performing as far as possible realistic plant specific fire risk analyses (fire PSA), should be developed. The present Technical Report gives an overview on the methodologies developed in this context for assessing the fire hazard.

The first step of a fire PSA is the selection of critical plant areas called screening. Within the screening precess as starting point for the detailed analysis in the frame of probabilistic fire risk analyses, based on comprehensive fire specific information for all rooms of the buildings to be considered a group of rooms has to be selected for which fire specific and probabilistic in-depth investigations will be carried out. In the frame of the present research project RS 1112 a standardized approach for such a screening process has been developed.

This method is mainly based on the systematic compilation of comprehensive fire related information for each individual compartment. The primary information gathered is used for ranking of compartments in terms of fire load density conditional fire occurrence frequency, and possibilities of fire propagation. The local fire occurrence frequencies are estimated by means of the method of Berry. For the implementation and application of the methodology in the frame of PSA studies, an ACCESS database has been developed, both for compilation of the raw data as well as for further data analysis.

Furthermore, fire risk analyses to be carried out for nuclear power plants depend on the expert knowledge with respect to the location specific fire occurrence frequencies. Based on different methodologies applied for estimating fire occurrence frequencies for so-called critical plant areas which have been determined by the screening procedure, it can be demonstrated that such an estimation of fire frequencies is only possible applying a bottom up method. Therefore, a systematic standardised procedure with the four steps qualitative analysis, modelling, data, and quantification has been developed.

However, in the frame of developing such an approach, it became obvious that it is not possible to perform the step “modelling” (which means to determine a quantitative re-

quirement for calculating the fire occurrence frequency) by a comprehensive method because of the variety of fire specific parameters and their combinations. It has to be decided for each individual case on the basis of the specific room characteristics, on the technical as well as on fire physics correlation, and on the data available how to perform the modelling for estimating fire frequencies.

In the context of developing advanced methodologies for fire PSA, a probabilistic dynamics analysis with a fire simulation code including an uncertainty and sensitivity study has been performed for an exemplary scenario of a cable fire induced by an electric cabinet inside the containment of a modern Konvoi type German nuclear power plant taking into consideration the effects of fire detection and fire extinguishing means. With the present study, it was possible for the first time to determine the probabilities of specified fire effects from a class of fire events by means of probabilistic dynamics supplemented by uncertainty and sensitivity analyses.

The analysis applies a deterministic dynamics model, consisting of a dynamic fire simulation code and a model of countermeasures, considering effects of the stochastics (so-called aleatory uncertainties) as well as uncertainties in the state of knowledge (so-called epistemic uncertainties). By this means, probability assessments including uncertainties are provided to be used within the PSA.

This methodology provides a possibility to estimate e.g. the probability of a exceeding a critical temperature for safety related equipment in a particular plant area for a defined time period. Furthermore, the quality of this probability depending only on the given parameter and model uncertainties in the dynamics and the stochastic model can be assessed. Furthermore, the sensitivity analysis provides a ranking of the identified potentially significant epistemic uncertainties with respect to their contribution to the overall uncertainty. This ranking shows, where and to what extent the state of knowledge can be improved most effectively to enhance the meaningfulness of the PSA.

If necessary, the meaningfulness of the fire PSA results can be enhanced on performing of such an uncertainty and sensitivity analysis. The results of these studies also represent a measure for the meaningfulness of the PSA, particularly with respect to those parameters for which the uncertainty in the state of knowledge cannot be further reduced.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Die Auswahl kritischer Brandbereiche bei probabilistischen Brandanalysen	3
2.1	Problemstellung	3
2.2	Raumauswahl	3
2.3	Der brandspezifische Ereignisablauf im Auswahlprozess.....	9
2.3.1	Der vereinfachte Ereignisablauf für den Auswahlprozess.....	10
2.3.2	Benötigte Rauminformationen.....	12
2.3.3	Berechnung des Ereignisablaufs	13
2.4	Bestimmung der raumbezogenen Eintrittshäufigkeit eines Brandes.....	20
2.5	Festlegung kritischer Brandbereiche.....	23
2.6	Zusammenfassung.....	25
3	Die Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten.....	27
3.1	Problemstellung	27
3.2	Notwendigkeit raumbezogener Brandeintrittshäufigkeiten	28
3.3	Methodenüberblick.....	32
3.3.1	Theoretische Grundlagen.....	34
3.3.2	Top down-Verfahren	35
3.3.3	Bottom up-Verfahren.....	40
3.4	Systematische Vorgehensweise zur Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten.....	48
3.4.1	Methode	48
3.4.2	Beispiel.....	57
3.5	Zusammenfassung.....	60
3.6	Definitionen, Bezeichnungen und Abkürzungen	61
4	Berücksichtigung von Unsicherheiten bei Brandausbreitungsmodellen	63
4.1	Problemstellung	63

4.2	Rechenmodell	64
4.3	Analysewerkzeug	65
4.3.1	Potentiell wichtige Unsicherheiten	66
4.3.2	Probabilistische Modellierungen	67
4.4	Fortpflanzung der stochastischen Variabilität und der Kenntnisstandunsicherheit durch das Rechenmodell	89
4.4.1	Berücksichtigung der epistemischen und aleatorischen Größen in zwei Monte-Carlo-Simulationsschleifen	90
4.5	Logik des Modells der Gegenmaßnahmen	93
4.5.1	Kein Ansprechen von Brandmeldern	93
4.5.2	Ansprechen von genau einem Brandmelder	94
4.5.3	Ansprechen von genau zwei Brandmeldern.....	95
4.5.4	Ansprechen aller drei Brandmelder	95
4.6	Ergebnisse der probabilistischen Dynamikrechnung einschließlich Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse.....	96
4.7	Zusammenfassung.....	113
5	Schlussfolgerungen.....	115
6	Literatur.....	117
7	Abbildungsverzeichnis	123
8	Tabellenverzeichnis	126

1 **Einleitung**

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsvorhabens zur Entwicklung fortschrittlicher Methoden für probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) /GRS 98/ wurden Untersuchungen zur Verbesserung des methodischen Herangehens bei der Analyse des übergreifenden, anlageninternen Ereignisses Brand durchgeführt.

Zielsetzung der Arbeiten war, die vorhandenen Methoden so weiterzuentwickeln bzw. zu ergänzen, um die Systematik und Realitätstreue probabilistischer Analysen der Brandsicherheit zu erhöhen. Nach Durchsicht der bisher sowohl national als auch international angewandten Vorgehensweisen bei probabilistischen Brandanalysen wurden folgende Schwerpunkte als Vorhabensziele definiert:

- Entwicklung einer Systematik zur Quantifizierung von Häufigkeiten für lokale Entstehungsbrände unter Berücksichtigung räumlicher und technischer anlagen-spezifischer Gegebenheiten,
- Entwicklung einer Methode zur dynamischen Analyse des Brandverlaufs, der Brandbekämpfungsmaßnahmen und der resultierenden Komponentenausfälle unter Berücksichtigung der stochastischen Variabilität.

Als Ergebnis der Untersuchungen liegen folgende Ergebnisse vor:

- Auswahl kritischer Brandbereiche bei probabilistischen Brandanalysen /FAS 01/
- Bestimmung anlagenspezifischer Eintrittshäufigkeiten von Entstehungsbränden in Räumen von Kernkraftwerken (KKW) /TUE 02a/
- Unsicherheitsanalysen zu einem Kabelbrandszenario im Sicherheitsbehälter einer Konvoi-Anlage /HAI 02/.

In vorliegendem Bericht werden alle Ergebnisse des oben genannten Forschungsvorhabens zusammenfassend dargestellt.

In Kapitel 2 wird ein systematischer Ansatz zur Durchführung des Auswahlverfahrens bei probabilistischen Brandanalysen vorgestellt. Durch die Nutzung einer als Datenbank geführten Informationssammlung kann mit Hilfe des Verfahrens von Berry eine Rangfolge von Räumen in dem zu untersuchenden Gebäude der Anlage bzgl. der Ein-

trittshäufigkeit von Entstehungsbränden automatisch erstellt und als Auswahlkriterium in vier Schritten genutzt werden.

Räume, die im Auswahlverfahren als wichtig erkannt wurden, sind im Rahmen einer durchzuführenden probabilistischen Brandanalyse anschließend detailliert zu untersuchen. Dazu gehört die Bestimmung der lokalen Brandeintrittshäufigkeit. Für Detailanalysen ist ein Vorgehen entsprechend dem Verfahren von Berry nicht ausreichend. In Kapitel 3 des vorliegenden Berichts wird ausgehend von einer Zusammenfassung der international angewandten Verfahren zur Bestimmung von lokalen Brandeintrittshäufigkeiten eine systematische Vorgehensweise abgeleitet. Dabei wurde allerdings deutlich, dass sich der Arbeitsschritt Modellierung (Aufstellung einer quantitativen Vorschrift zur Berechnung der Eintrittshäufigkeit) durch die Vielzahl der möglichen brandspezifischen Einflussgrößen und deren Kombinationen nicht durch eine umfassende Methode abdecken lässt. Hier wird immer anhand der konkreten Raumeigenschaften, der technischen und brandphysikalischen Zusammenhänge und der vorhandenen Datenbasis im Einzelfall entschieden werden müssen, wie die Modellierung zu erfolgen hat.

In Kapitel 4 wird gezeigt, wie die Wahrscheinlichkeit von Brandfolgen unter Angabe von Unsicherheits- und Sensitivitätsaussagen mit Hilfe der probabilistischen Dynamik aus einer Klasse von Brandereignissen ermittelt werden kann. Dazu werden bei der Anwendung eines deterministischen Rechenmodells, bestehend aus dem Dynamikmodell für Brandsimulationsrechnungen und einem Gegenmaßnahmenmodell, sowohl stochastische Einflüsse (so genannte aleatorische Unsicherheiten) als auch Kenntnisstandunsicherheiten (so genannte epistemische Unsicherheiten) berücksichtigt. Auf diese Weise werden Wahrscheinlichkeitsaussagen einschließlich von Unsicherheitsangaben zur weiteren Verarbeitung in der Brand-PSA zur Verfügung gestellt.

Einige der beschriebenen Verfahren konnten inzwischen im Rahmen einer PSA der Stufe 2 für eine Konvoi-Anlage praktisch erprobt werden. Die entsprechenden Ergebnisse sind in /HAI 02a/ enthalten.

2 Die Auswahl kritischer Brandbereiche bei probabilistischen Brandanalysen

2.1 Problemstellung

Die Durchführung einer probabilistischen Brandanalyse umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Auswahl relevanter Raumbereiche,
- Durchführung von - insbesondere brandspezifischen - Detailanalysen für alle ausgewählten Raumbereiche,
- Einbindung der brandspezifischen Ergebnisse in eine vorhandene, eventuell zu erweiternde PSA.

In Kapitel 2 dieses Berichts wird eine neue Methodik zum ersten Arbeitsschritt, der Auswahl relevanter Raumbereiche, beschrieben. Bei der Erarbeitung einer geeigneten Methode wurde sich einerseits an den in der internationalen Literatur dokumentierten Vorgehensweisen orientiert (siehe dazu die Literaturstellen in der Tabelle 2.1) und andererseits versucht, die im PSA-Leitfaden /FAK 97, Anhang B/ beschriebene Methode umzusetzen. Die ersten Anwendungsergebnisse dieser neu entwickelten Methode sind im Bericht /HAI 02a/ veröffentlicht. Dort sind auch im Detail die Abweichungen der hier beschriebenen Methode von dem Vorgehen im PSA-Leitfaden behandelt worden.

2.2 Raumauswahl

Der neu abgeleitete Auswahlprozess stützt sich allein auf leicht zu erhebende ingenieurtechnische Informationen zu jedem einzelnen Raumbereich in den untersuchten Gebäuden. Im Unterschied zu den meisten bekannten Verfahren (vgl. Tabelle 2.1) wird keine Unterteilung in einen qualitativen und einen quantitativen Auswahlprozess vorgenommen. Insbesondere auf das in der internationalen Literatur als "quantitatives screening" bezeichnete Vorgehen, bei dem schon im Auswahlprozess Kriterien benutzt werden, die Kenntnisse über die in jedem Raumbereich durch Brand hervorgerufene Häufigkeit von Gefährdungszuständen voraussetzen, wird aus Gründen der Methoden-Praktikabilität verzichtet.

Der Auswahlprozess unterscheidet die folgenden Arbeitsschritte:

- **Informationssammlung:**
Zusammenstellung aller benötigten Informationen zu jedem Raum des Gebäudes,
- **Auswahlprozess (screening:)**
Festlegung der Räume (bzw. einer Rangfolge von Räumen), für die brandspezifische Detailanalysen erforderlich sind.

Nachfolgende Informationen werden zur brandspezifischen Beschreibung eines Raumes benötigt:

- a) Identifikation des Raumes:
Gebäudebezeichnung, Raumnummer, Kote, Brandabschnitt
- b) Beziehungen zu den Nebenräumen:
Aufzählung aller direkt angrenzenden Nebenräume und der entsprechenden Verbindungen (offen, Türen einschließlich Art der Tür, Montageöffnungen, etc.) und Abgrenzungen (Brandwand, feuerbeständige Wand, etc.);
Aufzählung aller Brandschutzklappen sowie Rauch- und Wärmeabzugsklappen;
Vorhandensein von Montageöffnungen
- c) Brandspezifische Angaben:
Brandlast, Art des Brandgutes, Vorhandensein von Brandmeldern und Art der Melder, Vorhandensein von Löscheinrichtungen und Art der Einrichtungen
- d) Sicherheitstechnische oder wichtige betriebliche Einrichtungen im Raum:
Zu jedem Raum ist ein Inventarverzeichnis anzulegen. Räume mit sicherheitstechnischen Einrichtungen oder mit den zugehörigen Kabeln sowie mit wichtigen Einrichtungen des Leistungsbetriebes oder mit den zugehörigen Kabeln sind gesondert zu kennzeichnen.

Die Durchführung des Auswahlprozesses erfolgt mit Hilfe folgender Kriterien:

- Ausschlusskriterien
 - Räume mit einer Brandlast kleiner als 90 MJ/m^2 werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen

- Räume, die keine Einrichtungen entsprechend d) enthalten und keine offenen Verbindungen zu Nachbarräumen mit derartigen Einrichtungen besitzen, werden von der Betrachtung ausgeschlossen

– Ordnungskriterien

Die nach Anwendung der Ausschlusskriterien verbliebenen Räume werden entsprechend den nachfolgenden Kriterien geordnet:

- Brandlast,
- Eintrittshäufigkeit,
- Brandausbreitung.

Das erste Ausschlusskriterium, nach welchem Räume mit einer Brandbelastung von weniger als 90 MJ/m^2 nicht weiter betrachtet werden, entspricht dem Brandlastkriterium in /FAK 97/ für eine relevante Mindestbrandbelastung, wie sie sich sowohl aus /KTA 99, Kapitel 3.1.2.2/ als auch aus konventionellen Brandschutzregeln ableitet.

Mit dem zweiten Ausschlusskriterium wird - vereinfachend für das Auswahlverfahren - angenommen, dass nur direkte Nachbarschaftsbeziehungen von Räumen einbezogen werden. Mögliche Brandausbreitungen werden nur für den Nebenraum betrachtet.

Mit den Ordnungskriterien können Kennzahlen für die Bedeutung des Raumes im Hinblick auf die Notwendigkeit der Durchführung von Detailuntersuchungen abgeleitet werden.

Das zuvor beschriebene Ausschluss- und Auswahlverfahren lässt sich auf der Grundlage einer datenverarbeitungsgerechten Speicherung der Rauminformationen weitestgehend automatisieren. Aufgrund von Besonderheiten in der Gebäudestruktur oder beim Rauminventar sollte aber immer klar sein, dass ingenieurtechnische Überlegungen im Einzelfall zu anderen Ausschlussregeln oder Rangfolgen führen können. Ein derartiges Beispiel wäre, dass Räume mit einer Brandbelastung von weniger als 90 MJ/m^2 in die weitere Analyse eingeschlossen werden sollten, wenn die Brandlast sich im Wesentlichen nur auf einem kleinen Anteil der gesamten Raumfläche verteilt (punktuelle Brandlast) und durch die Brandwirkungen sicherheitstechnisch wichtige Anlagenteile unmittelbar betroffen sein können.

Die automatisch ermittelten Rangfolgen der Räume in Bezug auf brandrelevante Gesichtspunkte liefern für den Experten komprimierte Informationen zur endgültigen Entscheidung, ob ein Raum für detaillierte Untersuchungen ausgewählt werden muss oder nicht. In Zweifelsfällen ist man jederzeit in der Lage, auf sämtliche Primärinformationen zurückzugreifen.

Zur flexiblen Durchführung des Prozesses der Auswahl kritischer Brandbereiche wurde eine ACCESS-Datenbank RÄUME zur Informationssammlung und Auswertung eingesetzt. Eine Kurzbeschreibung zur Anwendung dieser Datenbank ist in /FAS 01/ gegeben. Zur Informationsrecherche sind Anlagenbegehungen unumgänglich. Die Notwendigkeit mehrerer Begehungen ergibt sich daraus, dass zum einen den vorhandenen Unterlagen nicht alle benötigten Informationen entnommen werden können, zum anderen die Unterlagen unter Umständen nicht die nach der Errichtung vorgenommenen Änderungen in der Anlage ausweisen oder bei der ersten Begehung Details übersehen werden, die sich erst bei der Datenerfassung in der Datenbank als neue Frage stellen. In Vorbereitung von Begehungen ist es günstig, kleine (maximal DIN A4-Format) Gebäudegrundrisse mit bereits erkannten Fragestellungen anzufertigen, in die dann vor Ort sowohl die Antworten als auch neue Beobachtungen eingetragen werden können.

Tab. 2.1 Durchführung des Auswahlprozesses - Methodenvergleich

	Leitfaden /FAK 97/	USNRC /DEY 98/, /NRC 79/	FIVE /MOW 92/, /DEY 98/, /APO 93/, /PLC 91/	IAEA /IAE 98/	NUREG-1150 /NRC 90/, /NRC 79/
Allgemeines	Auswahlprozess: Methode zur systematischen Erfassung von solchen Räumen, bei denen als Brandentstehungsort mit einem relevanten Beitrag zur Häufigkeit von Gefährdungszuständen gerechnet werden kann.	Auswahlprozess: Identifikation wichtiger Brandentstehungsorte		Eine Brand-PSA setzt die systematische Durchsicht aller Räume des Kraftwerks voraus.	In NUREG-1150 wurde für die KKW Surry und Peach Bottom exemplarisch eine Brandanalyse durchgeführt.
Informations-sammlung	Informationssammlung wird als Teil der qualitativen Raumauswahl aufgefasst.	Kraftwerksbegehungen sind erforderlich.		Ein großer Umfang anlagenspezifischer Informationen wird benötigt: 1. brandspezifische Daten 2. PSA-Daten zu auslösenden Ereignissen; zeitaufwendiger Prozess; Mehrere Kraftwerksbegehungen sind erforderlich. Aufteilung des KKW in Brandbereiche, für die anschließend getrennt eine Raumauswahl durchgeführt wird.	Kraftwerksbegehungen sind erforderlich. Ein großer Umfang an anlagenspezifischen Informationen wird benötigt, insbesondere Raumzuordnungen von Komponenten und Kabeln.

	Leitfaden /FAK 97/	USNRC /DEY 98/, /NRC 79/	FIVE /MOW 92/, /DEY 98/, /APO 93/, /PLC 91/	IAEA /IAE 98/	NUREG-1150 /NRC 90/, /NRC 79/
Qualitative Raumauswahl	Auswahlkriterien B, S, T, Z; dabei ist B ein quantitatives Kriterium bez. der Brandbelastung und S, T, Z Rauminventarkriterien. Im Auswahlverfahren werden Raumpaare betrachtet und die quantitative Größe der äquivalenten Branddauer herangezogen. Jedem wesentlichen Brandbereich werden das entsprechende auslösende Ereignis oder die ausgelöste Transiente zugeordnet.	Ausschlusskriterium: Räume, die keine Ausrüstungen des sicheren Abfahrens enthalten und in denen Brände keine Auswirkungen auf derartige Ausrüstungen in angrenzenden Räumen haben. Entsprechend /NRC 79/ sind die Ausrüstungen des sicheren Abfahrens für jeden relevanten Raumbereich aufzulisten. Die eigentliche Raumauswahl wird subjektiv ausgeführt.	Bei FIVE ist beim Auswahlprozess ein systematisches Vorgehen durch vorgegebene Schritt-für-Schritt-Anweisungen gewährleistet.	(screening by impact) Eliminierung unwesentlicher Brandszenarien auf der Basis von vorwiegend qualitativen Kriterien; Kriterien: * Vorhandensein sicherheitsrelevanter Komponenten und Kabel * Brandlast * Effektivität von Brandbarrieren	Einteilung der Anlage in brandspezifische Anlagenbereiche (entspr. /NRC 79/); Ausschlusskriterium: Anlagenbereiche, die keine Ausrüstungen des sicheren Abfahrens enthalten.
Quantitative Raumauswahl	Für Räume mit PSA-relevanten Komponenten wird die Eintrittshäufigkeit von Gefährdungszuständen durch Brand abgeschätzt. Ausschlusskriterium: Räume, die weniger als 1% zu der brandbedingten Gesamthäufigkeit beitragen (insgesamt nicht mehr als 5%).	Annahme: Bei einem Brand fallen alle Komponenten im Raum brandbedingt aus. Ausschlusskriterium: Beitrag zur Kernschadenshäufigkeit kleiner 1.0 E-8	Bei FIVE ist beim Auswahlprozess ein systematisches Vorgehen durch vorgegebene Schritt-für-Schritt-Anweisungen gewährleistet.	(screening by frequency) Ausgangspunkt sind die Ergebnisse der qualitativen Raumauswahl; konservative Schätzung der Häufigkeit von Kernschadenszuständen für die dort ermittelten Szenarien; bei der Schätzung wird schon auf das vorhandene PSA-Modell zurückgegriffen; Auswahl: Vergleich mit vorgegebenen Schwellenwert	Anlagenbereiche mit einer Brandeintrittshäufigkeit kleiner 1.0 E-6 werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Vertiefte Auswahl von Brandszenarien auf der Grundlage von Schnittmengen zur Berechnung von Kernschadenszuständen.
Zusammenfassung	Ausgangspunkt der Detailanalysen sind die Ergebnisse der qualitativen oder der quantitativen Raumauswahl.			Detailanalysen werden für die Szenarien nach der quantitativen Auswahl durchgeführt (Reduktion der Konservatismen)	

2.3 Der brandspezifische Ereignisablauf im Auswahlprozess

Ein detaillierter brandspezifischer Ereignisablauf muss mindestens die in der folgenden Tabelle enthaltenen Abfragen umfassen.

Tab. 2.2 Verzweigungspunkte in einem brandspezifischen Ereignisablauf

Verzweigungspunkte im Ereignisablauf	Bemerkungen
Brandentstehung	Brandeintrittshäufigkeit; Ausgangspunkt des brandspezifischen Ereignisablaufs
Brandentdeckung und -meldung	
frühe Brandmeldung	
Personal	Meldung durch anwesende Personen direkt aus dem Brandbereich; Neben der Häufigkeit der Anwesenheit von Personen im Raum ist auch die Nichtverfügbarkeit von Meldeanlagen (Druckknopfmelder, Telefonanlagen u. a.) zu betrachten.
automatische Brandmelder	Nichtverfügbarkeit der im Raum vorhandenen automatischen Brandmelder
späte Brandmeldung	
Personal	Meldung durch anwesende Personen aus Nachbarbereichen oder Erkennung des Brandes durch indirekte Hinweise auf der Warte; Neben der Häufigkeit der Anwesenheit von Personen im Nachbarraum ist auch die Nichtverfügbarkeit von Meldeanlagen (Druckknopfmelder, Telefonanlagen etc.) zu betrachten.
automatische Brandmelder	Nichtverfügbarkeit der in den Nebenräumen vorhandenen automatischen Brandmelder
Brandbekämpfung	
Raumabschluss	Türen, Lüftung, Brandschutzklappen
Personal	Brandlöschung mittels tragbaren Feuerlöschgerät oder Löschanlage vor Ort
Feuerwehr	
Beschädigung der Einrichtungen durch Brandbekämpfung	
Brandausbreitung	
Barrieren	Feuerwiderstandsdauer
Raumabschluss	Türen, Lüftung, Brandschutzklappen

In Tabelle 2.3 sind die interessierenden Endzustände im brandspezifischen Ereignisablauf aufgeführt.

Tab. 2.3 Endzustände im brandspezifischen Ereignisablauf

Endzustände	Bemerkungen
a	Schaden beschränkt sich auf den Entzündungsort im untersuchten Raum
b	Ausfall und Zerstörung aller Komponenten im untersuchten Raum
c	Ausfall und Zerstörung aller Komponenten im untersuchten Raum; Ausbreitung des Brandes, d.h. es wird zusätzlich vom Ausfall und der Zerstörung von Komponenten in den benachbarten Räumen ausgegangen.

2.3.1 Der vereinfachte Ereignisablauf für den Auswahlprozess

Zur Durchführung eines automatischen Auswahlprozesses ist es erforderlich, den detaillierten brandspezifischen Ereignisablauf (vgl. Tabelle 2.2) so zu vereinfachen, dass

- eine standardisierte Auswertung möglich wird und
- möglichst viele der Raummerkmale (Informationssammlung) automatisch berücksichtigt werden können.

Der für den Auswahlprozess genutzte vereinfachte Ereignisbaum ist in Abbildung 2.1 angegeben.

An dieser Stelle ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass es bei dem Auswahlverfahren noch nicht um die Ableitung korrekter probabilistischer Kenngrößen geht. Es kommt lediglich darauf an, die eventuellen Folgen eines Brandes in einem gegebenen Raum mit denen eines anderen Raumes zu vergleichen. Die in dem Auswahlverfahren nachfolgend berechneten Kenngrößen sind also nur zum Vergleich der Räume geeignet. Als Wahrscheinlichkeit dafür, dass bei einem Brand in einem Raum ein bestimmter Endzustand erreicht wird, sind sie nicht zu verwenden. Die Ermittlung derartiger Wahrscheinlichkeiten ist in einem Auswahlverfahren nicht zu leisten, hierfür erfolgen in der PSA vertiefte Analysen mit Unsicherheitsbewertung.

Im vereinfachten Ereignisbaum kommt eine Reihe von vereinfachenden Annahmen zum Tragen:

- Wenn keine Brandmeldung erfolgt, werden in Abhängigkeit vom Lüftungsabschluss nur noch die Endzustände b oder c (siehe Tabelle 2.3) erreicht.

- Die Möglichkeit der Selbstlöschung wurde schon durch das Ausschlusskriterium „Brandlast < 90 MJ/m²“ /FAK 97/ implizit berücksichtigt. Es wird weiterhin angenommen, dass ein erfolgreicher Raum- und Lüftungsabschluss die Brandausbreitung verhindert.
- Erfolgt eine rechtzeitige Brandmeldung, wird angenommen, dass keine Maßnahmen erfolgen oder möglich sind, um den Brand lüftungstechnisch einzuschränken (dies betrifft die Sequenzen 2 und 3 im vereinfachten Ereignisablauf, Abb. 2.1).
- Erfolgt eine frühe Brandbekämpfung, so bleiben die Brandauswirkungen auf den Entstehungsort beschränkt.
- Bei einer erfolgreichen späten Brandbekämpfung wird trotzdem angenommen, dass alle Komponenten im Raum durch die Verzögerung bei der Löschung des Brandes ausgefallen sind.
- Bei einfachen Türen als Verbindung zwischen den Räumen wird grundsätzlich die Möglichkeit des Offenstehens in Betracht gezogen. Als einfache Türen werden Verbindungen zwischen den Räumen bezeichnet, die nicht als Brandschutztüren entsprechend DIN 4102 klassifiziert sind.

Weitere vereinfachende Annahmen werden bei der Diskussion der einzelnen Verzweigungen des brandspezifischen Ereignisablaufes erläutert (siehe Kapitel 2.3.3).

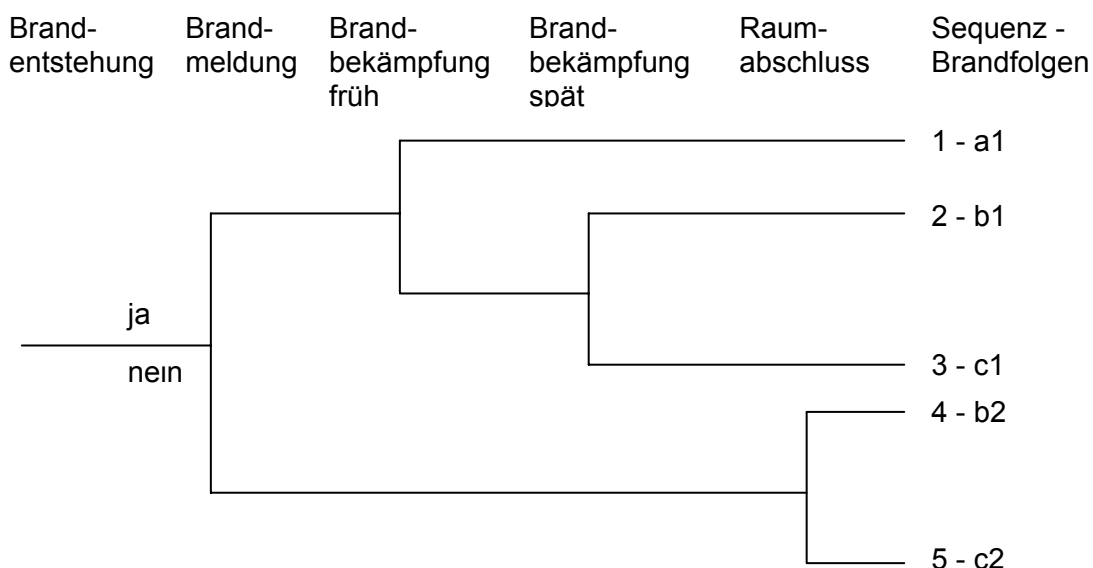


Abb. 2.1 Brandspezifischer Ereignisablauf für den Auswahlprozess

2.3.2 Benötigte Rauminformationen

Zur Berechnung der Brandeintrittswahrscheinlichkeit und des brandspezifischen Ereignisablaufs ist für jeden Raum eine Anzahl von Informationen erforderlich. Diese Angaben können in ein Formular (siehe Abbildung 2.2) eingetragen werden. Das angezeigte Formular ist der ACCESS-Datenbank RÄUME entnommen.

Angaben B zur Berechnung der
Brandeintrittswahrscheinlichkeit

Angaben E zur Berechnung des
brandspezifischen Ereignisablaufs

Brandeintrittswahrscheinlichkeit	
Personen im Raum	selten
Umfang mechanischer Einrichtungen	gering
Umfang elektrischer Einrichtungen	gering
Zündtemperatur des Materials	FP > 250 Grad
Verteilung brennbares Material	im überwiegenden Teil des

Brandmeldung

automatische Brandmelder

☒ nah

☐ fern

Brandbekämpfung

☒ Handlöschher

☒ Löschanlage

Brandausbreitung

☒ Raum offen

☒ Brandschutztür

☐ Brandschutzklappe

Angaben B zur Berechnung der Brandeintrittswahrscheinlichkeit

Angaben E zur Berechnung des brandspezifischen Ereignisablaufs

B1

B2

B3

B4

B5

B6

E1

E2

E3

E4

E5

E6

E7

E8

Abb. 2.2 Eingabedaten zur Berechnung von Brandeintrittshäufigkeiten und brandspezifischen Ereignisabläufen im Auswahlprozess

In Tabelle 2.4 sind die in das Formular (Abbildung 2.2) einzugebenden Werte beschrieben.

Tab. 2.4 Angaben zur Berechnung des brandspezifischen Ereignisablaufs

Parameterbezeichnung (siehe Abb. 2.2)	Erläuterungen zur Eingabe
B1	B1 ist durch den Brandanalytiker zu setzen, nähere Erläuterungen siehe in Tabelle 2.6
E1	Für die Belegung von E1 (Vorhandensein von Personen im Raum) gibt es 5 Möglichkeiten. E1 wird sowohl zur Berechnung der Eintrittshäufigkeiten als auch zur Berechnung der Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Brandes und der Nichtverfügbarkeit der Brandbekämpfung herangezogen.
E2	E2 ist zu setzen, wenn ein automatischer Brandmelder im Raum vorhanden ist.
E3	E3 ist zu setzen, wenn in einem offenen direkt angrenzenden Nebenraum ein automatischer Brandmelder vorhanden ist. Ein Raum gilt als offen, wenn er offen zum Nachbarraum ist oder nur durch eine einfache Tür (keine Brandschutztür) oder Drahtgittertür abgetrennt ist.
E4	E4 ist zu setzen, wenn manuelle Löscheinrichtungen im Raum oder im Nachbarraum vorhanden sind. Bei der Berechnung der Nichtverfügbarkeit der frühen Brandbekämpfung wird zusätzlich der Parameter E1 herangezogen.
E5	E5 ist zu setzen, wenn eine stationäre Löschanlage im Raum vorhanden ist. Hier wird vorausgesetzt, dass die Löschanlage tatsächlich nur für den speziellen Raum vorgesehen ist, d.h. von Löschanlagen in offenen Nachbarräumen wird kein Kredit genommen. Bei der Berechnung der Nichtverfügbarkeit der frühen Brandbekämpfung wird zusätzlich der Parameter E1 herangezogen.
E6 bis E8	Möglichkeiten der Brandausbreitung werden pauschal durch die Angaben E6 bis E8 beschrieben.
E6	E6 ist zu setzen, wenn der Raum offen (offen, einfache Tür, d.h. keine Brandschutztür, Drahtgittertür) zu einem Nachbarraum ist. Für den Auswahlprozess ist E6 die dominante Angabe bei der Beurteilung der Möglichkeiten zur weiteren Brandausbreitung. Nur wenn der Raum geschlossen ist, werden die Angaben E7 und E8 bei der Berechnung der Nichtverfügbarkeit des Raumabschlusses relevant.
E7	E7 ist zu setzen, wenn der Raum zu einem beliebigen Nachbarraum mit einer Brandschutztür ausgestattet ist.
E8	E8 ist zu setzen, wenn im Raum Brandschutzklappen vorhanden sind.

2.3.3 Berechnung des Ereignisablaufs

Zur Berechnung des vereinfachten Ereignisablaufs (vgl. Abbildung 2.1) werden ausschließlich generische Daten verwendet. Wie weiter unten erläutert, sind die Daten

dem PSA-Leitfaden /FAK 97/ entnommen und modifiziert worden. Die Anlagenspezifität wird an dieser Stelle der Analyse allein durch die Berücksichtigung qualitativer Informationen (vgl. Angaben E1 bis E10 in Kapitel 2.3.2) realisiert. Bei der Durchführung des Auswahlprozesses kommt es weniger auf den konkreten Wahrscheinlichkeitswert an, sondern es geht zunächst nur um eine Rangfolge der Räume in Bezug auf ihre Brandanfälligkeit und die entsprechenden Brandauswirkungen. Für die wichtigsten, im Auswahlprozess identifizierten Räume ist eine detaillierte Analyse durchzuführen, in der dann auch anlagenspezifische quantitative Kenndaten herangezogen werden müssen. Das bedeutet, dass für diese Räume der Wert der Brandeintrittshäufigkeit, z. B. durch die bottom up-Methode (siehe Kapitel 2.3.4), überprüft werden muss, der brandspezifische Ereignisablauf raumspezifisch zu detaillieren ist und die Daten für Brandmeldung, -bekämpfung und -ausbreitung anlagenspezifisch zu überarbeiten sind.

In den Verzweigungspunkten des vereinfachten brandspezifischen Ereignisablaufs (siehe Abbildung 2.1) werden die nachfolgenden Annahmen und Daten verwendet.

- Verzweigung **Brandmeldung**

Folgende Daten werden benötigt:

- Anwesenheit von Personen im Raum und in den Nachbarräumen (vgl. Angabe E1 in Abbildung 2.2),
- Vorhandensein von automatischen Brandmeldern im Raum (vgl. Angabe E2 in Abbildung 2.2),
- Vorhandensein von automatischen Brandmeldern in unmittelbar anschließenden Nachbarräumen (vgl. Angabe E3 in Abbildung 2.2).

Die Erkennung der Möglichkeit einer indirekten Branderkennung wird nur in Ausnahmefällen schon im Auswahlprozess möglich sein, deshalb ist diese Einflussgröße erst in den detaillierten brandspezifischen Ereignisablauf einzubeziehen.

Bei der Anwesenheit von Personen im Raum werden folgende Fälle unterschieden (die Wahrscheinlichkeiten P1 und P2 wurden /FAK 97, Tabelle 7.4/ entnommen):

Tab. 2.5 Entdeckungswahrscheinlichkeiten für einen Brand

Anwesenheit	Wahrscheinlichkeit P1, dass ein Entstehungsbrand durch die Personen im Raum nicht entdeckt wird	Wahrscheinlichkeit P2, dass Personen im Nachbarbereich auch in der Vollbrandphase den Brand nicht entdecken
ständig	0.1	0.001
meistens	0.8	0.02
ein Drittel der Zeit	0.99	0.2
während der Rund- gänge	1	0.5
selten	1	0.5

Bei der Bestimmung der Eintrittshäufigkeit wird bei der Anwesenheit zwischen „während der Rundgänge“ und „selten“ unterschieden. Beiden Möglichkeiten wird der gleiche Wahrscheinlichkeitswert zugewiesen.

Die Interpretation des Parameters *Anwesenheit* (siehe Tabelle 2.5) ist anlagenspezifisch durchzuführen. So ist es sicherlich nicht angemessen, dem Parameter *Anwesenheit* den Wert „während der Rundgänge“ zuzuordnen, wenn Brandläufer etwa alle drei Stunden auf Rundgänge gehen, um die Brandgefahr durch frühzeitige Entdeckung zu minimieren. Mit den vorgegebenen Möglichkeiten für den Parameter *Anwesenheit* (Tabelle 2.5) gelingt es nicht, zwischen Rundgängen alle drei Stunden, jeden Tag oder jede Woche zu unterscheiden. Auch solche spezifischen Unterscheidungen, ob eine Person allein oder ob gleichzeitig zwei Rundgänger unterwegs sind, können - obwohl durchaus relevant - nicht einbezogen werden. Insgesamt scheint hier die Methode von Berry /BER 79/ überarbeitungswürdig, um damit die speziellen Zustände in Kernkraftwerken besser widerspiegeln zu können.

Der automatische Auswahlprozess erfolgt unter folgenden Annahmen als Arbeitshypothese:

- die Häufigkeit der Anwesenheit von Personen im unmittelbar anschließenden Nachbarraum ist gleich der Anwesenheit von Personen im betrachteten Raum,
- die Brandmeldung erfolgt immer spät (siehe Abbildung 2.3).

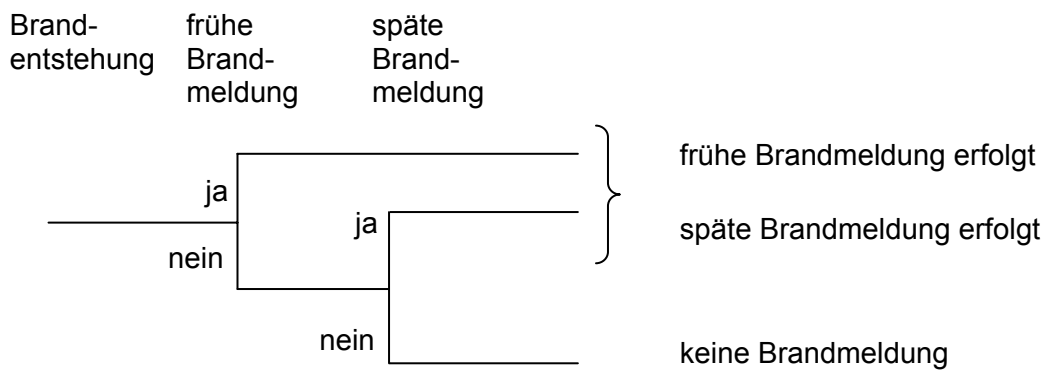


Abb. 2.3 Verzweigung Brandmeldung im brandspezifischen Ereignisablauf (Auswahlprozess)

Weitere Daten (alle generisch aus /FAK 97/):

- P1, P2
Die Entdeckung und Meldung eines Brandes durch Personen wird durch die Wahrscheinlichkeiten P1 und P2 beschrieben. Die Möglichkeit des Versagens von Druckknopfmeldern und anderen durch den Menschen zu bedienenden Meldevorrichtungen (z. B. Telefonanlagen) wird beim Auswahlprozess nicht betrachtet.
- P3
mittlere Nichtverfügbarkeit für die automatische Brandmeldung im Raum (frühe Brandmeldung): 0.02
- P4
mittlere Nichtverfügbarkeit für die automatische Brandmeldung in benachbarten Räumen: 0.2

Die Wahrscheinlichkeit, dass keine Brandmeldung erfolgt, berechnet sich bei den oben getroffenen Annahmen aus dem Produkt $P1 * P2 * P3 * P4$. Dabei werden die $P_{i,j} = 3.4$, gleich 1 gesetzt, wenn keine automatische Meldeanlage vorhanden ist.

- **Verzweigung Brandbekämpfung (früh)**

Die frühe Brandbekämpfung ist abhängig von der Anwesenheitsdauer von Personal im Raum (bzw. in direkt angrenzenden Nachbarräumen) und dem Vorhandensein von

Handfeuerlöschgeräten bzw. stationären Löschanlagen. Es sind Festlegungen für folgende Wahrscheinlichkeiten zur Brandbekämpfung zu treffen:

- P6: Nichtverfügbarkeit einer frühen Brandbekämpfung durch Personen,
- P7: Nichtverfügbarkeit einer frühen automatischen Brandbekämpfung.

Für den Auswahlprozess wird festgelegt, dass eine frühe Brandlöschung per Hand nicht möglich ist ($P6 = 1$), wenn kein Handfeuerlöschgerät im Raum bzw. im Nebenraum vorhanden ist. Ist ein Handfeuerlöschgerät vorhanden, wird in den Fällen, dass ständig oder meistens Personen im Raum oder Nebenraum sind, $P6 = 0.05$ gesetzt (vgl. /FAK 97, Tabelle 7.6/). In den anderen Fällen gilt $P6 = 1$.

Wenn zusätzlich eine stationäre Löschanlage vorhanden sein sollte, wird $P7 = 0.1$ (ungünstigster Wert aus /HOF 94, S. 47/, Wert b für stationäre CO_2 -Löschanlagen) gesetzt. Dies aber nur in den Fällen, dass ständig oder meistens Personen im Raum oder Nebenraum anwesend sind. Die Möglichkeit, dass nach erfolgreicher Meldung eine manuelle Auslösung der Löschanlage von der Warte stattfinden könnte, wird beim Auswahlprozess konservativ nicht berücksichtigt.

Zusammengefasst:

$$P6 = \begin{cases} 1 & \text{wenn kein Handfeuerlöscher vorhanden oder Personen nur selten im Raumbereich sind} \\ 0.05 & \text{wenn Personen meistens oder ständig im Raumbereich sind und ein Handfeuerlöscher vorhanden ist.} \end{cases}$$

$$P7 = \begin{cases} 1 & \text{wenn keine stationäre Löschanlage vorhanden oder Personen nur selten im Raumbereich sind} \\ 0.1 & \text{wenn Personen meistens oder ständig im Raumbereich sind und eine stationäre Löschanlage vorhanden ist.} \end{cases}$$

Für die Versagenswahrscheinlichkeit einer frühen Brandlöschung gilt $P6 * P7$.

• **Verzweigung Brandbekämpfung (spät)**

Bei der manuellen Brandbekämpfung durch die Werksfeuerwehr wird von einer Versagenswahrscheinlichkeit von $P8 = 0.5$ ausgegangen /ABB 94, S. 48/. Von einem eventuellen Vorhandensein einer stationären Löschanlage wird zu diesem Zeitpunkt bei

dieser Verzweigung kein Kredit mehr genommen, da vom Ausfall dieser Anlage bei der frühen Bekämpfung ausgegangen wird. Bei einer detaillierten Betrachtung des brand-spezifischen Ereignisbaumes ist hier zu differenzieren.

- **Verzweigung Raumabschluss**

Erfolgt keine Brandmeldung, kann nur durch passiv wirkende Einrichtungen des Raumabschlusses (Brandschutztüren, Brandschutzklappen) eine Ausbreitung des Brandes verhindert werden.

Brandschutztüren:

Wurde bei der Informationssammlung zwischen den verschiedenen Arten von Brandschutztüren unterschieden, kann hier mit detaillierten Datenangaben gerechnet werden.

Vorerst wird dabei angenommen, dass alle Brandschutztüren ohne Feststellvorrichtung ausgestattet sind. In Abhängigkeit von der Häufigkeit der Begehung der Räume liegt die Nichtverfügbarkeit P9 für die Funktion „Brandschutztür geschlossen“ zwischen 0.05 und 0.1. Dieser Wert stellt eine Einschätzung für regelwidriges Festklemmen der Tür durch Betriebspersonal dar /HOF 94/.

$$P9 = \begin{cases} 0.05 & \text{Personen sind nicht „meistens“ oder „ständig“ oder „ein Drittel der Zeit“ im Raum} \\ 0.1 & \text{Sonst} \end{cases}$$

Anmerkung:

P9 = 0, wenn keine Brandschutztür vorhanden ist. Die Nichtverfügbarkeit P12 des Raumabschlusses wird 1 gesetzt, wenn der Raum offen ist bzw. nur eine einfache Tür den Raum abschließt.

Brandschutzklappen:

Brandschutzklappen im Abluftkanal (/FAK 97, Tabelle 7.5/):

Mittlere Nichtverfügbarkeit P10

P10 = 0,1 bei Versagen der thermischen Auslösung über Schmelzlot), P10 = 0, wenn keine Brandschutzklappe im Abluftkanal vorhanden ist.

Brandschutzklappen im Zuluftkanal (/FAK 97, Tabelle 7.5/):

Mittlere Nichtverfügbarkeit P11

$$P_{11} = \begin{cases} 0.6 & \text{Brandschutztüren geschlossen (P9 = 0)} \\ 0.9 & \text{Brandschutztüren offen (P9 = 1)} \end{cases}$$

Abhängig von der Wahrscheinlichkeit P9 ergibt sich $P_{11} = P_9 \cdot 0.9 + (1 - P_9) \cdot 0.6$.
 $P_{11} = 0,1$ bei Versagen der thermischen Auslösung über Schmelzlot, $P_{11} = 0$, wenn keine Brandschutzklappe im Zuluftkanal vorhanden ist.

Für den automatischen Auswahlprozess wird nicht zwischen Brandschutzklappen im Zu- und Abluftkanal unterschieden. Weiterhin wird die Anzahl der vorhandenen Brandschutzklappen nicht in die Berechnung einbezogen. Die Nichtverfügbarkeit einer Brandschutzklappe wird konservativ mit $P_{11} = 0.63$ festgelegt (ungünstigster Wert für eine Brandschutzklappe im Zuluftkanal).

Für den Auswahlprozess ergibt sich damit die Nichtverfügbarkeit des Raumabschlusses P12 durch folgende einfache und konservative Abschätzung:

$$P_{12} = \begin{cases} 1 & \text{Raum ist offen (bzw. nur durch eine normale Tür (keine klassifizierte Brandschutztür) bzw. eine Drahtgittertür geschlossen)} \\ P_9 + P_{11} - P_9 \cdot P_{11} & \text{sonst} \end{cases}$$

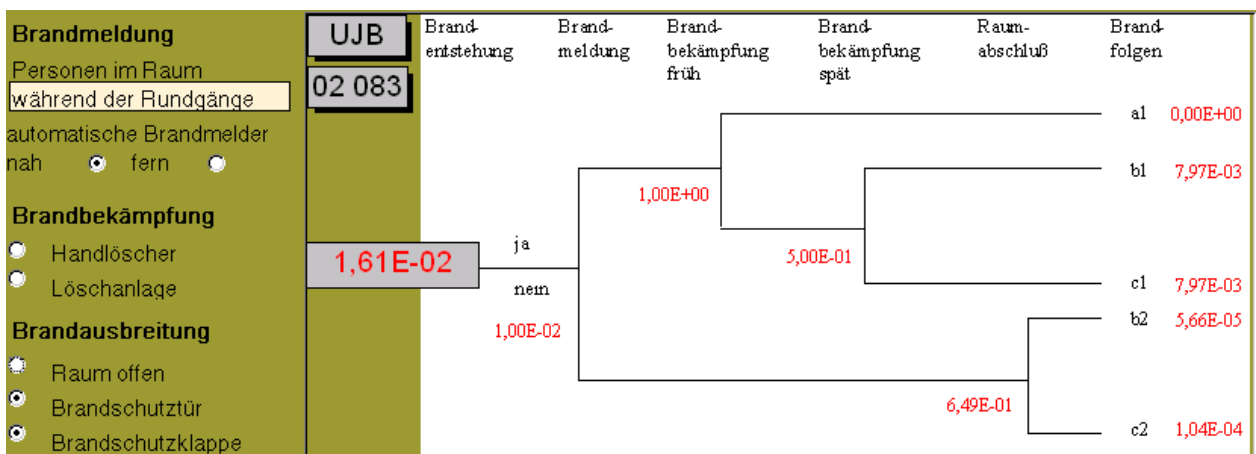


Abb. 2.4 Anzeige Berechnung Brandauswirkungsdiagramm eines Raumes

Sind die benötigten Informationen E1 bis E10 (vgl. Abbildung 2.2) bekannt, kann mit den zuvor festgelegten Daten der raum- und brandspezifische Ereignisablauf berechnet und angezeigt werden (Abbildung 2.4).

Die Berechnung der in Abbildung 2.4 angezeigten Eintrittshäufigkeit eines Brandes wird im nächsten Kapitel erläutert.

2.4 Bestimmung der raumbezogenen Eintrittshäufigkeit eines Brandes

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Eintrittshäufigkeit eines Brandes - bezogen auf einen speziellen Raum eines Gebäudes - zu bestimmen. Die erste Vorgehensweise (top down) geht davon aus, dass nur die Eintrittshäufigkeit für das Gebäude oder für einen größeren Raumbereich bekannt ist, beispielsweise aus generischen statistischen Auswertungen eingetretener Ereignisse. Die Eintrittshäufigkeiten für die einzelnen Räume im Raumbereich werden dann mit Hilfe von Raumeigenschaften daraus äquivalent bestimmt. Die zweite Vorgehensweise (bottom up) geht von der Analyse der Brandmöglichkeiten im Raum aus, die dann mit einer Fehlerbaumanalyse ausgewertet wird.

Für die top down-Methode gibt es verschiedene Ansätze. So kann z. B. eine Wichtung der Brandeintrittshäufigkeit des jeweiligen Raumbereichs auf der Grundlage der Raumflächen vorgenommen werden. Die top down-Methode von Berry /BER 79/ - wie sie auch im PSA-Leitfaden /FAK 97/ beschrieben ist - nutzt zusätzlich Raumeigenschaften, die potentielle Zündmöglichkeiten quantitativ bewertbar machen. Die Methode von Berry bezieht bereits wesentliche anlagenspezifische Informationen in die Analyse ein und sollte vorzugsweise beim Auswahlverfahren eingesetzt werden. Eine elektronische Aufbereitung und Auswertung der Rauminformationen - wie sie hier vorgestellt wird - ist dazu unbedingt erforderlich.

Die bottom up-Methode zur Bestimmung der raumbezogenen Eintrittshäufigkeit eines Brandes durch eine detaillierte Fehlerbaumanalyse kann zur Überprüfung der Ergebnisse des Auswahlverfahrens sowie bei Detailanalysen eingesetzt werden. Diese Methode ist anzuwenden, wenn nach dem Auswahlverfahren festgestellt wurde, dass Brände im entsprechenden Raum größere Beiträge zur Häufigkeit der Gefährdungszustände liefern und deshalb an die Aussagesicherheit hohe Anforderungen zu stellen sind. Diese Methode wurde unter anderem in /BRE 99/ angewendet. Hier wurde die Brandentstehung in einem elektrischen Verteilerschrank unter Berücksichtigung der

Ausfallarten „Kurzschluss“ und „heiße Klemmstellen“ modelliert. In /GRS 93/ wurde diese Methode bereits bei der Untersuchung eines Ölbrandes mit Leckageöl eingesetzt.

Auf die verschiedenen Möglichkeiten der Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten wird detailliert in Kapitel 3 dieses Berichts eingegangen.

Zur Bestimmung der jährlichen Brandeintrittshäufigkeiten pro Raum im Rahmen des Auswahlverfahrens einer probabilistischen Brandanalyse von Kernkraftwerken ist die top down-Methode nach Berry /BER 79/ zu nutzen. Hier wird diese Methode vor allem in Bezug auf die benötigten Eingabeparameter zur automatischen Berechnung der Eintrittshäufigkeit aller Räume eines zu analysierenden Raumbereichs für die Datenbank RÄUME beschrieben. Eine formale Kurzbeschreibung der Methode wird in Kapitel 3.3.2 gegeben.

Es wird dabei vorausgesetzt, dass für die zu analysierenden Raumbereiche des Kernkraftwerkes generische Eintrittshäufigkeiten pro Anlagenbetriebsjahr bekannt sind. Wenn ein Raumbereich n Räume hat, dann ist die aus generischem Datenmaterial bekannte Eintrittshäufigkeit für diesen Raumbereich auf die n Räume, entsprechend den dort herrschenden Bedingungen für eine Brandentstehung, äquivalent aufzuteilen. Werden die Eintrittshäufigkeiten von Bränden in den Räumen nur zur Auswahl kritischer Raumbereiche eingesetzt, kann an dieser Stelle der Analyse auch von einer generischen Brandeintrittshäufigkeit von 1 ausgegangen werden.

Durch die zuvor durchgeführte Analyse der brandschutz- und anlagentechnischen Gegebenheiten wurden schon m der n Räume als nicht signifikant im Hinblick auf Möglichkeiten der Brandentstehung und Brandauswirkungen bewertet. So werden Räume mit einer Brandbelastung von weniger als 90 MJ/m^2 von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Ebenso werden Räume nicht betrachtet, die keine wichtigen sicherheitstechnischen oder betrieblichen Einrichtungen enthalten und keine offenen Nachbarräume mit derartigen Einrichtungen haben. Weitere Ausschlussmöglichkeiten auf Grundlage ingenieurtechnischer Bewertungen sind möglich, müssen aber in der Analyse nachvollziehbar dokumentiert sein. Die generische Eintrittshäufigkeit für den jeweiligen Raumbereich (oder das Gebäude) wird demzufolge für die einbezogenen Räume konservativ auf $n - m$ Räume bezogen.

Die zur Berechnung der Brandeintrittshäufigkeit benötigten Informationen B2 bis B5 werden für jeden Raum in das entsprechende Formular (siehe Abbildung 2.2) eingegeben. Für nicht betrachtete Räume ist die Angabe B1 nicht zu setzen. Anschließend ist man mit der ACCESS-Datenbank RÄUME in der Lage, die Berechnungen für alle relevanten Räume durchzuführen und nachvollziehbar anzuzeigen (Abbildung 2.5).

Tab. 2.6 Angaben zur Berechnung der Eintrittshäufigkeit eines Brandes im Raum

Parameterbezeichnung (vgl. Abb. 2.2)	Erläuterungen zur Eingabe
B1	B1 ist durch den Brandanalytiker zu setzen. Nur die gekennzeichneten Räume eines Gebäudes werden gemäß der Methode von Berry mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit größer Null belegt. Räume, bei denen B1 nicht belegt ist, werden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Automatisch werden die Räume mit einer Brandbelastung von weniger als 90 MJ/m ² ausgeschlossen. Weiterhin werden auch die Räume automatisch ausgeschlossen, welche keine sicherheitstechnischen oder wichtigen betrieblichen Einrichtungen und auch keine derartigen Einrichtungen in einem offenen Nachbarraum enthalten. Es kann eine Reihe weiterer ingenieurtechnischer Gründe geben, dass Räume nicht in die weitere Betrachtung eingeschlossen werden. Dies ist dann ingenieurtechnisch zu begründen, und B1 ist per Hand zu setzen.
B2 bis B6	Durch die Angaben B2 bis B6 werden die Parameter für die Methode von Berry spezifiziert. Die Eingabe wird durch vorgegebene pop-Up-Menüs erleichtert.
B2	Einer der folgende Werte ist entsprechend den Raumgegebenheiten für B2 (Anwesenheit von Personal im Raum) auszuwählen: * ständig * meistens * ein Drittel der Zeit * während der Rundgänge * selten
B3	Einer der folgende Werte ist entsprechend den Raumgegebenheiten für B3 (Umfang mechanischer Einrichtungen) auszuwählen: * groß * durchschnittlich * gering
B4	Einer der folgende Werte ist entsprechend den Raumgegebenheiten für B4 (Umfang elektrischer Einrichtungen) auszuwählen: * groß * durchschnittlich * gering
B5	Einer der folgende Werte ist entsprechend den Raumgegebenheiten für B5 (Zündtemperatur des Materials) auszuwählen: * brennbares Material ständig vorhanden, leicht entzündlich, Flammpunkt < 20 °C * brennbares Material ständig vorhanden, leicht entzündlich, 20 °C < Flammpunkt < 250 °C * brennbares Material ständig vorhanden, leicht entzündlich, Flammpunkt > 250 °C * andere Fälle
B6	Einer der folgende Werte ist entsprechend den Raumgegebenheiten für B6 (brennbares Material vorhanden ...) auszuwählen: * im ganzen Raum * im überwiegenden Teil des Raumes * in der Hälfte des Raumes * in einem begrenzten Teil des Raumes * normalerweise nicht

Personal im Raum	während der Rundgänge		
Umfang mechan. Einrichtungen	groß		
Umfang elektr. Einrichtungen	durchschnittlich		
Zündtemperatur des Materials	FP > 250 Grad		
Verteilung brennbares Material	im ganzen Raum		

Gebäude Raum	Kote	Eintrittshäufigkeit Brand (Gebäude)	
UJB	02 083	-1,5	G= 1E+00

Brandeintrittswahrscheinlichkeit

Personen im Raum	A1=	0,2	C1=	0,1
Umfang mechanischer Einrichtungen	A2=	0,5		
Umfang elektrischer Einrichtungen	A3=	0,1		
Zündtemperatur des Materials	B=	0,01	C2=	0,99
Verteilung brennbares Material	F=	0,02		

Maßzahl Zündquelle und Leitfeuer

$A = 1 - (1 - A1)(1 - A2)(1 - A3)$ und $P = AB(1 - C1C2)(1 - F)$

A= 6,40E-01

P= 5,65E-03

Brandeintrittswahrscheinlichkeit =

$P * G / (\text{Summe der P aller Räume des Gebäudes})$ 1,61E-02

Abb. 2.5 Darstellung der Anzeige für die Berechnung der Eintrittshäufigkeit eines Raumes

2.5 Festlegung kritischer Brandbereiche

Nach Durchführung der in Kapitel 2.3 beschriebenen Quantifizierungen zum vereinfachten brandspezifischen Ereignisablauf können drei Rangfolgen für die nach dem Ausschlussverfahren übrig gebliebenen Räume aufgestellt werden:

- Rangfolge nach Brandlast

Die Räume werden entsprechend ihrer Brandlast geordnet. Bei der Auswertung der Listen in einem ersten Arbeitsschritt ist zu beachten, dass die Räume von Raumbereichen im Hinblick auf die Brandlast überbewertet sein können. Nach Einbeziehung von Informationen aus Anlagenbegehungen kann hier spezifiziert werden, z. B. Brandlast konzentriert sich auf nur einige Räume des Raumbereichs oder

Brandlast verteilt sich gleichmäßig auf alle Räume des Raumbereichs. Nach Korrektur der Angaben ist die Rangliste erneut zu erstellen.

- Rangfolge nach Eintrittshäufigkeit

Die Räume werden entsprechend der Brandeintrittshäufigkeit pro Jahr und Raum geordnet. In den meisten Fällen wird es sich dabei um relative Eintrittshäufigkeiten (bezogen auf die Eintrittshäufigkeit 1 für das entsprechende Gebäude oder eine Menge von Räumen) handeln. Sollte die Brandeintrittshäufigkeit für das Gebäude, in dem sich die Räume befinden, bekannt sein, können Räume mit einer Brandeintrittshäufigkeit kleiner als 1.0 E-7/a (vgl. /FAK 97/) von vornherein von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.

- Rangfolge nach möglichen Brandauswirkungen

Die Räume werden entsprechend den bedingten Brandauswirkungen geordnet. Dabei werden nur die über den Raum hinausgehenden Auswirkungen berücksichtigt. Der Wert für die Brandfolgen berechnet sich aus $c_1 + c_2$ / (Brandwahrscheinlichkeit des Raumes), vgl. Bezeichnungen in Abbildung 2.4.

Die endgültige Entscheidung, in welcher Form welche Räume in die Detailanalyse einbezogen werden, erfolgt auf der Grundlage der errechneten Rangfolgen in einem Expertengespräch, an dem neben Brandschutz-Fachleuten Systemanalytiker und PSA-Experten teilnehmen sollten. Zur Unterstützung der Auswahl wurden komprimierte Rangordnungen entwickelt. Zwei Rangordnungen wurden standardisiert vorgegeben:

- Ordnung nach Rangzahlen:

Entsprechend den zuvor erstellten drei Rangfolgen erhält jeder Raum drei Rangzahlen. Ordnungsgröße ist die normierte Summe der Rangzahlen.

- Ordnung nach Länge des normierten Vektors der Kenngrößen Brandlast, Brandeintrittshäufigkeit, Brandauswirkungen.

Bei der Durchführung der Expertendiskussion ist dementsprechend für jeden (relevanten) Raum die zugehörige Rangzahl und das Rauminventar bekannt. Das Rauminventar wurde bei der Informationssammlung in der Datenbank „RÄUME“ erfasst. Das Rauminventar stellt auf dieser Stufe der Analyse ein wichtiges Auswahlkriterium dar.

Bei der endgültigen Auswahl der zu untersuchenden Räume sind dann folgende weitere, abschließende Arbeitsschritte erforderlich:

- Zusammenfassung von Räumen

Es ist zu klären, ob Räume, die zueinander offen sind, bei der weiteren Analyse als ein Raum aufgefasst werden können. In diesem Fall wären die Eintrittshäufigkeiten zu addieren (bzw. eine neue detaillierte bottom up-Berechnung durchzuführen) und die Brandauswirkungen würden sich auf alle in den offen verbundenen Räumen vorhandenen Ausrüstungen beziehen. Es wird häufig der Fall sein, dass Raumgruppen zusammengefasst werden können.

- Repräsentative Räume

Es ist zu klären, welche Räume als repräsentativ für andere Räume angesehen werden können. Auch in diesem Fall sind die Eintrittshäufigkeiten zu addieren.

2.6 Zusammenfassung

Es wurde eine Methode zur Auswahl kritischer Raumbereiche als Ausgangspunkt für deren detaillierte Untersuchung im Rahmen von probabilistischen Brandanalysen erarbeitet. Die Methode basiert vor allem auf der systematischen Erfassung aller brandrelevanten Informationen für jeden Raum eines zu untersuchenden Gebäudes. Diese primären, leicht zu erfassenden Informationen werden für die automatische Erstellung von Rangfolgen der Räume im Hinblick auf ihre Brandrelevanz genutzt. Die Rangfolgen beziehen sich auf die Kenngrößen Brandlast, bedingte Eintrittshäufigkeit eines Brandes und Möglichkeiten der Brandausbreitung. Zur Umsetzung der Methode wurde eine ACCESS-Datenbank erstellt, mit der sowohl die Datenerfassung als auch die Auswertung der Daten vorgenommen werden können.

3 Die Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten

3.1 Problemstellung

Die Bestimmung von Eintrittshäufigkeiten für Brände in ausgewählten Raumbereichen von Kernkraftwerken kann - zumindest für deutsche Anlagen - nur in Ausnahmefällen mit rein statistischen Modellansätzen erfolgen. Die vorliegende Datenbasis ist im allgemeinen nicht ausreichend, um statistisch signifikante Häufigkeiten ableiten zu können.

Andererseits liegen im Rahmen von probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) umfangreiche Erfahrungen dahingehend vor, mit welchen Methoden Zuverlässigkeitskenngrößen von technischen Systemen und Komponenten auf der Grundlage von sehr begrenztem anlagenspezifischen als auch generischen Datenmaterial bestimmt werden können. Als Beispiel kann das deduktive Vorgehen zur Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen von Systemen mittels der Fehlerbaummethode dienen. Dieses Vorgehen wird angewendet, um Datenbasen zu nutzen, die sich nur auf Komponenten der Systeme beziehen. Ein anderes Beispiel ist die Verwendung von generischem Datenmaterial als Vorinformation, welche dann durch die vorhandenen, direkt die Komponente betreffenden Daten modifiziert werden kann (Verfahren von Bayes). Diese methodischen Kenntnisse können analog auch bei der Bestimmung von lokalen Brandeintrittshäufigkeiten angewendet werden.

An den wenigen publizierten Beispielen zur Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten (z. B. /IPS 00/, /HAI 02a/, /HOU 97/) ist zu erkennen, dass es keine Standardmethode zur Ermittlung anlagenspezifischer, raumbezogener Brandeintrittshäufigkeiten geben kann. In Abhängigkeit von allen Raumeigenschaften (Größe, Inventar, Nutzung, Lüftungsbedingungen etc.) müssen raumspezifische Modelle zur Bestimmung der Häufigkeit von Entstehungsbränden abgeleitet werden.

In Kapitel 3.4 des vorliegenden Berichts wird als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen ein systematisches Vorgehen zur Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten beschrieben. Zuvor wird in Kapitel 3.2 diskutiert, wann im Rahmen einer probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) zu anlageninternen Bränden solche lokalen Brandeintrittshäufigkeiten benötigt werden. In Kapitel 3.3 wird ein Überblick zu den bekannten Verfahren gegeben.

3.2 Notwendigkeit raumbezogener Brandeintrittshäufigkeiten

Die Bestimmung der Eintrittshäufigkeit von Kernschadenzuständen ist das Ziel einer PSA für anlageninterne Brandereignisse (PSA Brand). Zur Durchführung der Brandanalyse werden alle kerntechnisch relevanten Gebäude eines Kernkraftwerks vollständig und abdeckend in Betrachtungseinheiten (Räume) zerlegt. Mehr oder weniger werden dabei die vorhandenen baulichen Strukturen berücksichtigt. Die Eintrittshäufigkeit von Kernschadenzuständen eines Kernkraftwerks $H^{KKW}(KSZ / Brand)$ unter der Bedingung eines Brandes ergibt sich aus der Summe der Eintrittshäufigkeiten von Kernschadenzuständen $H_i^{KKW}(KSZ / Brand)$, die durch Brände in den jeweiligen Räumen hervorgerufen werden. Die auf einzelne Räume bezogenen Eintrittshäufigkeiten von Kernschadenzuständen bestimmen sich aus (vgl. Abbildung 3.1):

- a) der Häufigkeit h_i eines Brandszenarios im Raum i ,
- b) den brandbedingten Ausfallwahrscheinlichkeiten von Einrichtungen im Raum i der Brandentstehung (Brandraum) sowie in dessen Nachbarräumen

$$p_{S1/i}, p_{S2/i}, p_{S3/i} \text{ und}$$

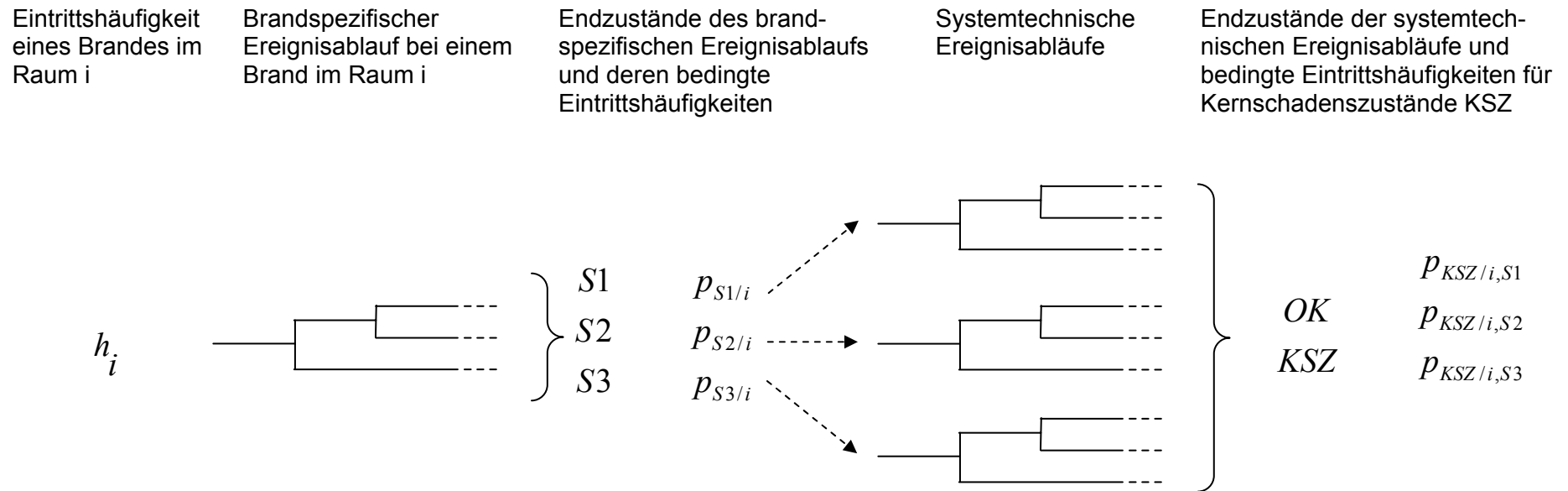
- c) den bedingten Wahrscheinlichkeiten von Kernschadenzuständen aufgrund des Ausfalls von Einrichtungen im Brandraum i und in dessen Nachbarräumen

$$p_{KSZ/i,S1}, p_{KSZ/i,S2}, p_{KSZ/i,S3}.$$

Bei den brandbedingten Ausfällen unterscheidet man drei Schadenzustände S1, S2 und S3 (siehe auch Tabelle 3.1).

Insgesamt ergibt sich für die brandbedingte Eintrittshäufigkeit von Kernschadenzuständen in einem Kernkraftwerk:

$$H^{KKW}(KSZ / Brand) = \sum_{i \in R} H_i^{KKW}(KSZ / Brand) = \sum_{i \in R} h_i \cdot \sum_{j \in \{S1, S2, S3\}} p_{j/i} \cdot p_{KSZ/i,j}.$$



$$H^{KKW}(KSZ / Brand) = \sum_{i \in R} H_i^{KKW}(KSZ / Brand) = \sum_{i \in R} h_i \cdot \sum_{j \in \{S1, S2, S3\}} p_{j/i} \cdot p_{KSZ/i,j} \quad \text{dabei ist } R \text{ die Menge aller Räume im Kraftwerk.}$$

Abb. 3.1 Bedingte Eintrittshäufigkeit eines Kernschadenzustandes infolge Brand

Tab. 3.1 Klassifikation brandbedingter Ausfälle

Klasse	Erläuterung
S1	Schaden beschränkt sich auf den Entzündungsort im untersuchten Raum. Für jeden konkreten Fall ist zu entscheiden, ob durch die Entzündung des Brandguts (und die getroffenen Brandbekämpfungsmaßnahmen) eine Einrichtung ausgefallen ist.
S2	Ausfall und Zerstörung aller Einrichtungen im untersuchten Raum durch den Brand (und die getroffenen Brandbekämpfungsmaßnahmen)
S3	Ausfall und Zerstörung aller Einrichtungen im untersuchten Raum durch den Brand (und die getroffenen Brandbekämpfungsmaßnahmen); Ausbreitung des Brandes, d. h. es wird zusätzlich vom Ausfall und der Zerstörung von Einrichtungen in den benachbarten Räumen ausgegangen.

Die Berechnung der raumbezogenen Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten $h_i, p_{j|i}, p_{KSZ/i,j}$ mit $j \in \{S1, S2, S3\}$ stellt einen nicht unerheblichen Arbeitsaufwand dar, der allerdings durch schrittweisen Ausschluss von Räumen deutlich gesenkt werden kann. Das geschieht im ersten Arbeitsschritt von probabilistischen Brandanalysen durch screening- bzw. Auswahlverfahren.

- **Beispiel 1:**

Auswahlverfahren der GRS /FAS 01/ - Erstellung von Rangfolgen von Räumen hinsichtlich ihrer Brandrelevanz

Als erstes werden Räume mit einer Brandbelastung weniger als 90 MJ/m² ausgeschlossen (1. Ausschlussregel). Anschließend werden auch solche Räume von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, die zwar eine Brandbelastung von mehr als 90 MJ/m² besitzen, aber keine sicherheitstechnischen Einrichtungen im Raum selbst und in den Nachbarräumen vorhanden sind (2. Ausschlussregel).

Diese Ausschlussregeln sind grundsätzlich anzuwenden. Besonderheiten sind immer kritisch zu hinterfragen. So kann beispielsweise eine sehr hohe Brandbelastung in einem durch die zweite Regel ausgeschlossenen Raum durchaus die Frage rechtfertigen, ob durch einen lang andauernden Brand Auswirkungen auf Einrichtungen in Räumen auftreten können, die weiter entfernt liegen.

Weitere Räume können gemäß dem Auswahlverfahren /FAS 01/ durch eine Gruppe von Experten von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden. Dazu liegen den Experten Rangfolgen der nach Anwendung der Ausschlussregeln verbliebenen Räume vor. Diese Rangfolgen beziehen sich auf die raumspezifische Brandbelastung, die raumspezifische Brandeintrittshäufigkeit sowie das Potential der Brandausbreitung unter Einbeziehung der raumspezifischen Brandmelde- und Bekämpfungsmöglichkeiten. In diesem Stadium des Auswahlverfahrens wird durch die Expertengruppe das Rauminventar in die Entscheidungsfindung einbezogen. Nur solche Räume sind als kritischer Brandbereich anzusehen, bei denen die Ausfälle der Einrichtungen auslösende Ereignisse hervorrufen oder transiente Vorgänge auslösen. Ist das nicht der Fall, können die entsprechenden Räume aus der Liste für Detailanalysen gestrichen werden.

Zuletzt kann aufgrund von Analogien, räumlichen Symmetrien und redundanten Ausstattungen von Räumen geprüft werden, ob für die notwendigen Detailanalysen Räume zusammengefasst werden können oder ob einzelne Räume als repräsentativ für andere zu betrachten sind.

- **Beispiel 2:**

Auswahlverfahren der schweizerischen HSK (*Hauptabteilung für die Sicherung der Kernanlagen*) /BEZ 94/ - Bestimmung so genannter minimaler Raumschnitte

In Analogie zur Begriffsbildung bei Fehlerbaumanalysen werden im Auswahlverfahren für das Schweizer Kernkraftwerk Beznau minimale Raumschnitte gesucht. Mathematisch gesehen handelt es sich bei minimalen Raumschnitten um Mengen von Räumen mit der Eigenschaft, dass bei brandbedingten Ausfällen der Einrichtungen in diesen Räumen davon auszugehen ist, dass es zu einem auslösenden Ereignis oder zum Ausfall von Sicherheitsfunktionen kommt. Ein minimaler Raumschnitt ist umso wichtiger, je kleiner die Anzahl der Räume in der Menge ist.

Für jeden Raum werden detaillierte Inventarlisten aufgestellt. Das eigentliche Verfahren zur Bestimmung der minimalen Raumschnitte verläuft iterativ auf der Basis der Inventarlisten der zur Störfallbeherrschung notwendigen Systemfunktionen und der Systemfehlerbäume. Als Hilfsmittel bei der Verdichtung der Informationen wird eine Raum-System-Matrix genutzt.

In /BEZ 94/ wird eingeschätzt, dass die Grenzen des Verfahrens vor allem in der mangelnden Kenntnis zum tatsächlichen Verlauf der Leistungs- und Kontrollkabel liegen. Das ist ein allgemeines Problem von Brandanalysen in Kernkraftwerken.¹ Es existiert auch beim zuvor beschriebenen Auswahlverfahren /FAS 01/, allerdings hat man es hier bei Anwendung der Ausschluss- und Ordnungsregeln mit einer stark verminderten Anzahl von Räumen zu tun.

Für die nach Anwendung eines screenings bzw. Auswahlverfahrens noch verbliebenen Räume, Raumbereiche oder minimalen Raumschnitte ist eine Detailanalyse erforderlich. Bei einer umfassenden Informationssammlung zu allen Räumen eines Kernkraftwerkes (insbesondere hinsichtlich der brandrelevanten bzw. brandschutztechnischen Gegebenheiten sowie zum Inventar) und einer konsequenten Anwendung von Auswahlverfahren kann die Anzahl der Räume, für die aufwendige Detailanalysen erforderlich sind, erheblich eingeschränkt werden.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit den verschiedenen, derzeit zur Verfügung stehenden Methoden zur Bestimmung der Häufigkeit von Bränden in einem Raum. Dabei wird auch auf die international vorliegenden Erfahrungen zurückgegriffen, die im Rahmen von probabilistischen Brandanalysen in Kernkraftwerken gesammelt wurden.

3.3 Methodenüberblick

Das bei der Schätzung einer Eintrittshäufigkeit h_i für Brände in einem Raum i auftretende Problem ist offensichtlich. Jeder Raum hat seine Besonderheiten, jeder Raum ist einzigartig, und deshalb werden kaum statistisch evidente Daten zur Ableitung der Eintrittshäufigkeit von Entstehungsbränden zur Verfügung stehen. Im Wesentlichen werden zwei Zugänge gewählt, um dieses Problem zu lösen bzw. zu umgehen.

Im ersten Zugang, dem so genannten top down-Verfahren, wird der Raum als Teil eines größeren Komplexes von Räumen (z. B. Teil eines Gebäudes oder eines Kernkraftwerkes) aufgefasst. Auf der Grundlage von Kenntnissen über die Brandeintrittshäufigkeit für das jeweilige Gebäude kann unter Hinzuziehung weiterer Eigenschaften die Brandeintrittswahrscheinlichkeit für den einzelnen Raum abgeleitet werden. Bei

¹ Bei der Durchführung einer Brand-PSA für das Kernkraftwerk Paks in Ungarn wurden sehr aufwendig mehr als 6000 Verlegungen von Kabeln nachvollzogen /CZA 99/.

solchen top down-Verfahren werden die brandspezifischen Eigenschaften des zu untersuchenden Raumes mit den entsprechenden Werten für die anderen Räume im Gebäude verglichen. Einige Beispiele zu einem derartigen Vorgehen werden in Kapitel 3.3.3 beschrieben. Man ist sich durchaus bewusst, dass bei einem derartigen Vorgehen eigentlich nur eine Verschiebung des Problems stattgefunden hat. Es ist genauso schwer, statistisch evidente Daten für ein Gebäude oder ein Kernkraftwerk zu erhalten (für amerikanische Kernkraftwerke wurden Eintrittshäufigkeiten für Brände in Gebäuden auf statistischer Basis berechnet /APO 85/, siehe auch Tabelle 3.3).

Diese Vorgehensweise wird vor allem bei Auswahlverfahren, dem so genannten screening im Rahmen von PSA zu Brand angewendet. Dabei geht es nicht um die Brandeintrittshäufigkeit an sich und die dementsprechenden Unsicherheiten, sondern um eine Wichtung der Räume untereinander aufgrund ihrer brandspezifischen Eigenschaften. Dies kann durchaus mit solchen top down-Verfahren geleistet werden.

Mit dem zweiten Zugang, dem so genannten bottom up-Verfahren, wird versucht, die Kenntnisse zum Raum so in kleinere Informationseinheiten (wie Art und Anzahl der Einrichtungen, Zündmöglichkeiten, Art und Häufigkeit von Personalhandlungen im Raum, etc.) zu zerlegen, dass dann auf dieser Grundlage statistisch evidente Daten zu erhalten sind. Die Zusammenfassung der einzelnen Informationen kann mittels der Fehlerbaummethode erfolgen. Bottom up-Verfahren sind geeignet für die Bestimmung der Brandeintrittshäufigkeit (mit Angabe von Unsicherheiten) von kritischen Raumbereichen. In Kapitel 3.3.3 werden das in Frankreich entwickelte bottom Up-Verfahren zur Bestimmung der Brandeintrittshäufigkeit für ein Kernkraftwerk und eine geeignete Durchführung der bottom up-Methode für einen einzelnen Raum beschrieben.

Es soll in diesem Zusammenhang nochmals auf einen wesentlichen Unterschied zwischen den top down- und bottom up-Verfahren hingewiesen werden. Bei den top down-Verfahren werden insbesondere auch Informationen aus dem Umfeld des untersuchten Raumes einbezogen. Die eigentlichen Eigenschaften des untersuchten Raumes gehen zwar auch in diese Methode ein, werden aber nicht im Detail untersucht. top down-Verfahren sind Vergleichsmethoden, bei denen eine Eintrittshäufigkeit für ein größeres Ganzes anteilig gewichtet wird. Bei bottom up-Verfahren wird im Wesentlichen auf Informationen zum Umfeld des zu untersuchenden Raumes verzichtet. Es werden nur raumimmanente Eigenschaften betrachtet, die dann allerdings im Detail untersucht werden.

3.3.1 Theoretische Grundlagen

Das Auftreten von Entstehungsbränden kann nur mit stochastischen Methoden analysiert werden. Brände sind bezogen sowohl auf die räumliche Situation (Kernkraftwerk, Gebäude, Raum) als auch auf Ausrüstungen von Kernkraftwerken seltene Ereignisse, deren Entstehung von unzähligen, nicht vorhersehbaren Umständen abhängt.

Als geeignete Modellvorstellung zur Beschreibung des Auftretens von Bränden bieten sich demzufolge homogene Poissonprozesse an. In diesem Fall berechnet sich die Eintrittshäufigkeit für Entstehungsbrände in einem Zeitraum t aus dem Erwartungswert der Poissonverteilung

$$P_t(\# \text{Brände} = m) = \frac{(\lambda \cdot t)^m}{m!} \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Der Erwartungswert h ergibt sich aus $h = \lambda \cdot t$.

Das Problem der Bestimmung der Eintrittshäufigkeit reduziert sich in diesen Fall auf die Bestimmung eines Parameters einschließlich der statistischen Unsicherheit. In Abhängigkeit vom vorhandenen Datenmaterial können dabei verschiedene statistische Verfahren genutzt werden, d.h. sowohl die klassische Maximum-Likelihood-Schätzung mit den entsprechenden Konfidenzintervallen als auch die Methode von Bayes /HAE 83/. Bei dem klassischen Schätzverfahren wird der Parameter λ als fest, aber unbekannt interpretiert. Beim Vorgehen nach Bayes geht man davon aus, dass der Parameter selbst eine Zufallsgröße ist.

Andere, erweiterte Modellvorstellungen als Grundlage zur Schätzung von Eintrittshäufigkeiten sind möglich. Beispielsweise wird in /HOC 81/ davon ausgegangen, dass sich Brände in Kernkraftwerken allgemein mit einem nichthomogenen Poissonprozess modellieren lassen. Dabei wird angenommen, dass die Zeit zwischen zwei Bränden nicht exponential-, sondern weibullverteilt ist. Dann ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für m Brände in einem Zeitraum t aus:

$$P_t(\# \text{Brände} = m) = \frac{(\lambda \cdot t^\beta)^m \cdot e^{-\lambda \cdot t^\beta}}{m!}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Für den Fall $\beta = 1$ stimmt dieses Modell mit dem homogenen Poissonprozess überein. In diesem Fall ist die Eintrittsrate der Entstehungsbrände $u(t) = \lambda \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} = \lambda$ konstant. Es ist sicher ein Vorteil des allgemeineren Modells, dass zeitliche Veränderungen in der Brandeintrittshäufigkeit beschrieben werden können ($\beta > 1$ steigende Eintrittsrate, $\beta < 1$ fallende Rate). Bei der statistischen Auswertung von kleinen Datenmengen sollte man aber gerade bestrebt sein, die Anzahl der Modellparameter möglichst gering zu halten. Mit der Anzahl der Parameter steigen auch die Schätzunsicherheiten. Die Maximum-Likelihood-Schätzungen und Konfidenzintervalle für λ und β sind in /HOC 81/ angegeben.

3.3.2 Top down-Verfahren

Bei den so genannten top down-Verfahren wird der zu untersuchende Raum als Teil eines größeren Komplexes von Räumen (z. B. Teil eines Gebäudes oder eines Kernkraftwerkes) aufgefasst. Auf der Grundlage von Kenntnissen über die Brandeintrittshäufigkeit zu dem jeweiligen Gebäude kann unter Hinzuziehung weiterer Eigenschaften die Brandeintrittshäufigkeit für den einzelnen Raum abgeleitet werden.

Top down-Verfahren sind nur in Ausnahmefällen zur Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten von Räumen bei Detailanalysen geeignet (z. B. Verfahren von Apostolakis für Räume in amerikanischen Kernkraftwerken, siehe Kapitel 3.3.2). Für probabilistische Brandgefahrenanalysen deutscher Kernkraftwerke wurde bisher auf die amerikanische Betriebserfahrung zurückgegriffen, um die Brandeintrittshäufigkeiten für ein Kernkraftwerk bzw. für bestimmte Anlagenbereiche bzw. Gebäude des Kraftwerkes zu ermitteln. Diese Werte waren dann Ausgangspunkt für den top down-Prozess zur Bestimmung von Eintrittshäufigkeiten ausgewählter Räume bzw. Raumbereiche (vgl. z. B. /GRS 90, S. 484/, Bestimmung der Eintrittshäufigkeit eines Ölbrands im Sicherheitsbehälter).

Die Unsicherheit bei der Übertragung der amerikanischen Betriebserfahrung auf deutsche Gegebenheiten kann nicht quantitativ bewertet werden. Solange keine belastbaren Daten zur Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten für deutsche Kernkraftwerke bzw. Anlagenbereiche vorliegen und damit auch keine Möglichkeit besteht, Unsicherheitsintervalle für diese Häufigkeiten anzugeben, sollten top down-Verfahren nicht für Detailanalysen angewendet werden.

Top down-Verfahren sind hingegen aufgrund der einfachen Vorgehensweise gut geeignet, um relative Brandeintrittshäufigkeiten im Rahmen von Auswahlverfahren bestimmen zu können.

Verfahren von Berry

Die Nutzung des Verfahrens von Berry im Rahmen des Auswahlprozesses („screening“) bei probabilistischen Brandanalysen wurde in Kapitel 1 beschrieben. Das Verfahren lässt sich wie folgt kurz umreißen:

Für einen Raum i eines Gebäudes G ist die Eintrittshäufigkeit h_i eines Brandes zu bestimmen. Die Brandeintrittshäufigkeit H^G sei bekannt.

Es ergibt sich
$$h_i = \frac{H^G \cdot P_i}{\sum_{k \in G} P_k}$$
 für alle Räume i aus dem Gebäude G , $i \in G$.

Dabei ist P_i eine Kenngröße für das Entstehen eines Leitfeuers (ungelöschter Entstehungsbrand, Brand breitet sich über den Entzündungsort hinaus aus) im Raum i .

P_i ergibt sich aus

$$P_i = A_i \cdot B_i \cdot (1 - C_{i1} \cdot C_{i2}) \cdot (1 - F_i) \text{ , wobei } A_i = 1 - (1 - A_{i1}) \cdot (1 - A_{i2}) \cdot (1 - A_{i3}) \text{ gilt.}$$

Die Bedeutung der verschiedenen Kenngrößen bzw. Parameter und ihre möglichen Werte sind Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Tab. 3.2 Im Verfahren von Berry verwendete Parameter /BER 79/

Beschreibung der Kenngröße		Werte der Kenngröße	
		qualitativ	quantitativ
A_i	Kenngröße zur Charakterisierung der Zündquellen im Raum i;	$A_i = 1 - (1 - A_{i1}) \cdot (1 - A_{i2}) \cdot (1 - A_{i3})$	
A_{i1}	Dauer der Anwesenheit von Personen im Raum i (Personen als Zündquelle)	ständig	0.70
		meistens	0.70
		ein Drittel der Zeit	0.30
		während der Rundgänge	0.20
		selten	0.10
A_{i2}	Umfang der mechanischen Einrichtungen im Raum i	groß	0.50
		mittel	0.30
		gering	0.10
A_{i3}	Umfang der elektrischen Einrichtungen im Raum i	groß	0.30
		mittel	0.10
		gering	0.05
P_i	Kenngröße für das Entstehen eines Leitfeuers im Raum i	$P_i = A_i \cdot B_i \cdot (1 - C_{i1} \cdot C_{i2}) \cdot (1 - F_i)$	
B_i	Entzündungswahrscheinlichkeit	Flammpunkt < 20 °C	1.00
		20 °C ≤ Flammpunkt ≤ 250 °C	0.10
		Flammpunkt > 250 °C	0.01
		andere Fälle	0.01
C_{i1}	Dauer der Anwesenheit von Personen im Raum i (Brandmeldung durch Personen)	ständig	0.99
		meistens	0.95
		ein Drittel der Zeit	0.90
		während der Rundgänge	0.10
		selten	0.00
C_{i2}	Löschwahrscheinlichkeit (ohne Hilfsmittel vor Ort, nur in Abhängigkeit vom Flammpunkt)	Flammpunkt < 20 °C	0.50
		20 °C ≤ Flammpunkt ≤ 250 °C	0.90
		Flammpunkt > 250 °C	0.99
		andere Fälle	0.99
F_i	Verteilung der Brandlasten im Raum (erlischt Feuer von selbst?)	im ganzen Raum verteilt	0.02
		im überwiegenden Teil des Raumes	0.20
		in der Hälfte des Raumes	0.50
		in einem begrenzten Teil	0.90
		keine Brandlast	0.95

Verfahren von Apostolakis

In /APO 85/ ist ein weiteres Vorgehen zur Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten beschrieben, welches dem top down-Verfahren zugeordnet werden kann. Nach Berechnung der gebäudespezifischen Eintrittshäufigkeiten mittels statistischer Erhebungen in amerikanischen Kernkraftwerken wird eine Wichtung dieses Wertes durch verschiedene Faktoren vorgenommen. Diese Faktoren werden durch Experten geschätzt. Folgende Größen fließen an Informationen ein: Anzahl der Räume im Gebäude, Rauminventar, räumliche Lage und Zuordnung von möglichen Brandherden, Zündquellen und wichtigen Einrichtungen.

Tab. 3.3 Brandeintrittshäufigkeiten auf der Grundlage der amerikanischen Betriebserfahrung (pro Anlagenbetriebsjahr während Leistungsbetrieb)

Anlagenbereich	Zündquelle	Anzahl Brände	Eintrittshäufigkeit
Hilfsanlagen-gebäude (DWR)	E- und Leittechniksschränke	15	1.9 E-2
	Pumpen	15	1.9 E-2
Reaktorgebäude (SWR)	E- und Leittechniksschränke	24	5.0 E-2
	Pumpen	12	2.5 E-2
Notstromdiesel-raum	Notstromdiesel	65	2.6 E-2
	E- und Leittechniksschränke	6	2.4 E-2
Schaltanlagen-raum	E- und Leittechniksschränke	19	1.5 E-2
Batterieraum	Batterien	4	3.2 E-3
Warte	E- und Leittechniksschränke	12	9.5 E-3
Kabelverteiler-raum	E- und Leittechniksschränke	4	3.2 E-3
Nebenkühl-wasserpumpen-raum	E- und Leittechniksschränke	3	2.4 E-3
	Löschpumpen	5	4.0 E-3
	Sonstige	4	3.2 E-3
Maschinenhaus	Turbine/Generator Erreger	5	4.0 E-3
	Turbine/Generator Öl	17	1.3 E-2
	Turbine/Generator Wasserstoff	7	5.5 E-3
	E- und Leittechniksschränke	16	1.3 E-2
	sonstige Pumpen	8	6.3 E-3
	Hauptspeisewasserpumpen	10	4.0 E-3
	Heizkessel	2	1.6 E-3
Radioaktiver Abfallbereich	verschiedene Komponenten	11	8.7 E-3

Anlagenbereich	Zündquelle	Anzahl Brände	Eintrittshäufigkeit
Transformatorenfeld (im Freien)	Maschinentransformator	5	4.0 E-3
	Eigenbedarfstransformator	2	1.6 E-3
	Transformator (Sonstige)	19	1.5 E-2
Gesamtanlage	Brandschutztafeln	3	2.4 E-3
	rotierende Umformer	7	5.5 E-3
	Nichtqualifizierte Kabeltrassen	8	6.3 E-3
	Kabelabzweig für qualifizierte Kabel	2	1.6 E-3
	Kabelabzweig für nicht qualifizierte Kabel	2	1.6 E-3
	Transformatoren (im Raum)	10	7.9 E-3
	Batterielader	5	4.0 E-3
	Abgas/H ₂ -Rekombinator	41	8.6 E-2
	Wasserstofftanks	4	3.2 E-3
	Andere H ₂ -Systeme	4	3.2 E-3
	Gasturbinen (ca. 130 Gasturbinenbetriebsjahre)	4	3.1E-2
	Kompressoren	6	4.7 E-3
	Ventilationsuntersysteme	12	9.5 E-3
	Aufzüge	8	6.3 E-3
	Trockner	11	8.7 E-3
	Mobile Zündquellen	13	1.3 E-3
	Kabelbrände, verursacht durch Schweißen	4	5.1 E-3
	Brände, verursacht durch Schweißen und Schneiden	20	3.1 E-2

Ein entsprechendes Vorgehen wie das von Apostolakis wurde beispielsweise auch bei der PSÜ (Periodische Sicherheitsüberprüfung) für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken in der Schweiz angewandt /GOE 99/ und wird auch im deutschen PSA-Leitfaden /FAK 97/ empfohlen. Ausgangspunkt sind dabei Eintrittshäufigkeiten von Entstehungsbränden, die auf der Grundlage amerikanischer Betriebserfahrung bestimmt wurden. Diese Häufigkeiten werden mit generischen Daten bzw. mit anlagenspezifischen Daten des zu untersuchenden Kernkraftwerks modifiziert (Anwendung des Vorgehens von Bayes) sowie auf die Gebäude und Räume der zu untersuchenden Anlage übertragen.

Der Vollständigkeit halber sind die amerikanischen Daten in Tabelle 3.3 angegeben. Es muss allerdings in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, dass die in /FAK 97/ verwendete amerikanische Statistik nur die Betriebserfahrung bis zum

31.12.1988 einschließt. Auf die Angabe der Wichtungsfaktoren zur Übertragung dieser Daten auf Verhältnisse in deutschen Kernkraftwerken wurde hier verzichtet (siehe dazu /FAK 97/), denn das beschriebene Vorgehen entspricht aus Sicht der GRS nicht mehr dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik.

3.3.3 Bottom up-Verfahren

In bottom up-Verfahren werden die für eine Brandrisikoanalyse relevanten Kenntnisse zum Raum in kleine brandspezifische Informationseinheiten (einzelne Brandlasten, Kabelstränge, technologische Komponenten, Leittechnik-Schränke, potentielle Zündmöglichkeiten, etc.) zerlegt, welche anschließend detailliert untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden dann geeignet zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeit von Bränden im Raum zusammengefasst. Nachfolgend werden Anwendungsbeispiele diskutiert. In Kapitel 3.3.3 wird auf zwei Anwendungen aus den probabilistischen Analysen der GRS verwiesen und das aktuelle Vorgehen zur Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten in französischen Kernkraftwerken beschrieben. Im Kapitel 3.4 wird dann versucht, auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungen eine allgemeine Vorgehensbeschreibung bei der Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten für Detailanalysen abzuleiten.

Beispiele aus probabilistischen Studien der GRS

- **Brandrisikoanalyse für eine SWR-Anlage (/GRS 93/)**

Bei der probabilistischen Brandrisikoanalyse für eine SWR-Anlage der Baulinie 72 wurde zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeit eines Entstehungsbrandes innerhalb des Sicherheitsbehälters ein gemischtes Vorgehen aus top down- und bottom up-Verfahren gewählt.

Durch Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich näher zu analysierende Brandereignisse auf den Sicherheitsbehälter eingrenzen lassen. Der Sicherheitsbehälter stellt einen brandgeschützten Bereich dar, der aus anlagentechnischen Gründen nicht in kleinere feuerbeständig abgetrennte Raumbereiche unterteilt werden kann. Wesentliche Brandlasten innerhalb des Sicherheitsbehälters stellen die Isolierungen der Kabel sowie das Öl für die Ölversorgung der Kühlmittelpumpen dar.

Zur Bestimmung der Brandeintrittshäufigkeit wurde anlagenspezifisch die Eintrittshäufigkeit relevanter Ölleckagen bestimmt. Obwohl keine der üblicherweise zu betrachtenden potentiellen Zündquellen für Ölleckagen vor Ort erkennbar war, wurde die Möglichkeit einer Entzündung nicht ausgeschlossen und - konservativ - eine bedingte Entzündungswahrscheinlichkeit von 0.01 angenommen.

Zur Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für einen Brand, bei welchem im Wesentlichen nur Kabelisolierungen betroffen sind, musste mangels vorliegender deutscher Daten auf die amerikanische Betriebserfahrung zurückgegriffen werden.

- **Probabilistische Brandanalyse für einen ausgewählten Raumbereich einer modernen Druckwasserreaktoranlage vom Typ Konvoi-DWR (/HAI 02a/)**

Für eine DWR-Anlage vom Typ Konvoi erfolgten unter anderem auch methodische Weiterentwicklungen zur PSA-Brand, in deren Rahmen neben einer Auswahl kritischer Brandbereiche auch für einen als sicherheitstechnisch relevant erachteten Raumbereich eine detaillierte probabilistische Ereignisablaufanalyse des Brandereignisses einschließlich Sensitivitäts- und Unsicherheitsstudien durchgeführt wurde. In dem zu untersuchenden Raumbereich nahe den Kabelverteilungen innerhalb des Sicherheitsbehälters wurde als Brandentstehungsort einer von zwei elektrischen Verteilerschränken angenommen. Jeder dieser Schränke ist mit einem Handschalter und mehreren Klemmstellen ausgerüstet. Die Möglichkeit eines Brandbeginns in einem solchen elektrischen Verteilerschrank ist durch folgende technische Möglichkeiten gegeben:

- Kurzschluss im Verteilerschrank,
- Erhitzung einer losen Klemmstelle.

Ein Fehler an einem Schalter, der zu einer Brandentstehung führen könnte, wurde ausgeschlossen. Weiterhin wurden menschliche Fehlhandlungen (wie z. B. Instandhaltungsfehler (lose Klemmstelle) oder das Übersehen von Hinweisen (Kurzschlussalarm)) in Betracht gezogen. Die Möglichkeiten einer Brandentstehung wurden in einem Fehlerbaum zusammengefasst. Die Daten für die technisch verursachten Ausfälle wurden /BRE 99/ entnommen.

Bei der hier beschriebenen Analyse lagen für den untersuchten Raum zusätzlich auch die Ergebnisse für die Eintrittshäufigkeit eines Entstehungsbrandes in dem betroffenen Raumbereich mittels der top down-Methode vor. Die mit der top down- und der

bottom up-Methode anlagen- und raumspezifisch ermittelten Werte für die Brandeintrittshäufigkeit stimmten dabei gut überein.

Französische Vorgehensweise

Nachfolgend wird eine Zusammenfassung der französischen Methode zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeit von Bränden in Kernkraftwerken gegeben. Dabei wird ausschließlich auf Informationen aus dem dazu vorliegenden Bericht /IPS 00/ zurückgegriffen.

Bei der französischen Vorgehensweise handelt es sich nicht um die Bestimmung der Brandeintrittshäufigkeit in einem einzelnen Raum oder Raumbereich, sondern um die Bestimmung einer Häufigkeit für ein Kernkraftwerk. Dennoch lässt sich die dabei angewandte Methode eindeutig den bottom up-Verfahren zuordnen, da die Häufigkeit für das Kernkraftwerk aus der Eintrittshäufigkeit von Bränden bezogen auf die in der Anlage vorhandenen Einrichtungen berechnet wird.

- **Auswertung der französischen Betriebserfahrung**

Bei dem in Frankreich vom Institute de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) in Zusammenarbeit mit Electricité de France (EdF) als Betreiber für PSA-Zwecke entwickelten Verfahren zur Ermittlung der Brandeintrittshäufigkeiten für französische Kernkraftwerke wird als erster Arbeitsschritt eine ausführliche generische und anlagen-spezifische Auswertung der Betriebserfahrung vorgenommen. Im Rahmen dieser Auswertung erfolgt zunächst eine Erfassung aller Brandereignisse in französischen Kernkraftwerken in einer Datenbank.

Dabei werden die erfassten Brandereignisse durch folgende Kenngrößen klassifiziert: Datum des Ereignisses, Name und Typ des Kraftwerks einschließlich Blocknummer, betroffenes Gebäude, Zustand des Reaktors bei Eintritt des Brandes (siehe Tabelle 3.4) und Entstehungsort des Brandes. Der Brandentstehungsort wird durch die in Tabelle 3.6 aufgeführten Referenzgruppen E charakterisiert. In diesem Zusammenhang ist der Begriff des Entstehungsortes nicht räumlich gemeint, d.h. es wird nicht nach dem Raumbereich der Brandentstehung gefragt, sondern die Zuordnung erfolgt danach, welche technische Ausrüstung als Ausgangspunkt und damit auch Entstehungsort des Brandes angesehen werden kann. Die Referenzgruppen sind nicht homogen, denn es werden zusätzlich zwei Sonderfälle einbezogen: die Brandent-

stehung durch Freisetzung mit Deflagration von Wasserstoff sowie die Verursachung von Entstehungsbränden durch Personal während Instandhaltungsarbeiten.

Tab. 3.4 Anlagenbetriebszustände zur Auswertung der französischen Betriebs- erfahrung bezüglich Brand

Zustand	Beschreibung
a	Normalbetrieb
b	Zwischenzustand beim Abfahren aus Normalbetrieb
c	Reaktor unterkritisch, kalt (normal)
d	Reaktor unterkritisch, kalt (nach ungeplantem Abfahren)
e	Reaktor unterkritisch, kalt (Brennelementwechsel)

Für den in der Studie betrachteten Zeitraum vom 21.04.1975 bis 01.03.1994 wurden für die französischen Kernkraftwerke 279 Brandereignisse gemeldet, davon 186 für Kernkraftwerke vom Typ 900 MW_e und 93 für Kernkraftwerke vom Typ 1300 MW_e. Von diesen 279 Ereignissen wurden 202 Ereignisse bei der Bestimmung der Brandeintrittshäufigkeit berücksichtigt. Ausgeschlossen wurden beispielsweise Ereignisse, die sich vor der Inbetriebnahme eines Kernkraftwerks ereigneten.

Nach der Klassifikation dieser 202 Ereignisse nach den oben genannten Kenngrößen erfolgten einfache, deskriptive statistische Auswertungen der Anzahl aufgetretener Brandereignisse bezüglich einzelner Kenngrößen und deren Kombinationen, wie z. B. in den Tabellen 3.4 und 3.5. Weitere Beispiele sind in /IPS 00/ enthalten.

Tab. 3.5 Erfasste Brände pro Betriebszustand bei Instandhaltungsarbeiten (nach /IPS 00/)

Zustand	Anzahl aufgetretener Brände
a	13
b	0
c	4
d	3
e	24

Besonders hervorgehoben wird die Klassifizierung der Brände im Hinblick auf ihre Referenzgruppe E, d.h. der Brandentstehung. Durch Wichtung der Anzahl der Brände bezüglich ihrer Brandentstehung mit der vergangenen Betriebszeit t kann somit die Brandeintrittshäufigkeit H bezogen auf die Referenzgruppe berechnet werden.

Tab. 3.6 Kenngröße Brandentstehung - Anzahl der Brände im Zeitraum t und zugehörige Eintrittshäufigkeiten pro Jahr

Brandentstehung	E(i,j)	# Brände	H(i,j)
Hochspannungseinrichtungen	E(1.0)	9	1.8 E-2
Turbinengenerator (einschließlich H ₂ -Lecks)	E(2.0)	24	4.7 E-2
Dieselgeneratoren	E(3.0)	6	1.2 E-3
Batterien	E(4.0)	0	1.4 E-3
Elektrische Einrichtungen mittlerer und niedriger Spannung	E(5.0)	28	5.5 E-2
Wechselrichter	E(5.1)	4	7.9 E-3
Gleichrichter	E(5.2)	2	3.9 E-3
Transformatoren	E(5.3)	3	5.9 E-3
Schaltschrank < 6.6 kV	E(5.4)	13	2.6 E-2
Schaltschrank 6.6 kV	E(5.5)	6	1.2 E-2
Schaltafeln, -schränke (dezentral)	E(6.0)	3	5.9 E-3
Leittechniksschränke	E(7.0)	8	1.6 E-2
Motoren	E(8.0)	5	9.8 E-3
Wäscher, Trockner, etc.	E(8.1)	1	2.0 E-3
Kompressoren, Kühlaggregate, etc.	E(8.2)	3	5.9 E-3
Kräne, Aufzüge, etc.	E(8.3)	1	2.0 E-3
Motorarmaturen	E(8.4)	0	1.4 E-3
sonstige Motoren	E(8.5)	0	1.4 E-3
Motorpumpen	E(9.0)	13	2.6 E-2
Motorpumpen (primär)	E(9.1)	5	9.8 E-3
ölgeschmierte Motorpumpen	E(9.2)	5	9.8 E-3
nicht mit Öl geschmierte Motorpumpen	E(9.3)	3	5.9 E-3
Elektrische Heizer, elektrische Widerstände	E(11.0)	13	2.6 E-2
Einrichtungen der Warte	E(12.0)	0	1.4 E-3
Sonstige elektrische Einrichtungen	E(13.0)	4	7.9 E-3
Büroausrüstung	E(13.1)	0	1.4 E-3
Wärmestau	E(13.2)	4	7.9 E-3
Turbine	E(14.0)	0	1.4 E-3
Wasserstoff (nicht enthalten in E(2.0))	E(15.0)	6	1.2 E-2
Instandhaltungsarbeiten	E(16.0)	46	9.1 E-2
während Betrieb	E(16.1)	13	2.6 E-2
bei abgeschaltetem Reaktor	E(16.2)	31	6.1 E-2
Turbinengetriebene Pumpen	E(17.0)	5	9.8 E-3
Lüfter / Gebläse (einschließlich E-Motoren)	E(18.0)	17	3.3 E-2
Sonstiges	E(19.0)	5	9.8 E-3

Die in Tabelle 3.6 genutzte Betriebszeit t zur Berechnung der Eintrittshäufigkeiten beträgt für den ausgewerteten Zeitraum 508.2 Reaktorjahre, das sind 399 Reaktorjahre für die 900 MW_e-Reaktoren und 109.2 Reaktorjahre für die 1300 MW_e-Reaktoren.

Die Eintrittshäufigkeiten $H(i,j)$ in Tabelle 3.6 beziehen sich auf die gesamte Referenzgruppe, d.h. beispielsweise, dass mit einer Eintrittshäufigkeit von $H(6.0) = 5.9 \text{ E-3/Jahr}$ ein Brand in einem Schaltschrank in einem französischen Kernkraftwerk auftritt.

Eine Schätzung für die Brandhäufigkeit eines einzelnen derartigen Schranks (und dieser Wert wäre interessant als generische Ausgangsgröße für die Berechnung entsprechender Häufigkeiten in deutschen Kernkraftwerken) ergibt sich erst, wenn $H(6.0)$ auf die Anzahl aller elektrischen Schaltschränke in französischen Kernkraftwerken bezogen wird. Zur Umsetzung der in /IPS 00/ beschriebenen Methodik wurden alle diese Gesamtkriterien $\#E(i,j)$ für die französischen Kernkraftwerke erfasst. Sie sind aber leider in /IPS 00/ nicht im Detail enthalten, sondern nur beispielhaft in einer tabellarischen Vorschrift zur Berechnung anlagenspezifischer Häufigkeiten in /IPS 00, Kapitel 4/.

- **Berechnung anlagenspezifischer Brandeintrittshäufigkeiten**

Bei der französischen Methode zur Berechnung anlagenspezifischer Brandeintrittshäufigkeiten wird zwischen der Brandeintrittshäufigkeit während des Leistungsbetriebs (Zustand a) und während des Nichtleistungsbetriebs (Zustände b, c, d, e) unterschieden:

- *Brandeintrittshäufigkeit bei Leistungsbetrieb (Zustand a):*

Zur Bestimmung der spezifischen Brandeintrittshäufigkeit werden die Auswertungsergebnisse zur französischen Betriebserfahrung bezüglich der Referenzgruppen E (vgl. Tabelle 3.6) und die Häufigkeit der Einrichtungen bezüglich der Referenzgruppen in dem jeweils betrachteten Kernkraftwerk herangezogen (zu den Bezeichnungen vgl. Tabelle 3.7).

Für die technischen Referenzgruppen ergibt sich:

$$H^{KKW}(i, j) = H(i, j) \cdot \frac{N^{KKW}(i, j)}{N(i, j)} \text{ und } H^{KKW}(i, 0) = \sum_j H^{KKW}(i, j)$$

und für die Eintrittswahrscheinlichkeit über alle technischen Referenzgruppen:

$$\sum_i H^{KKW}(i,0).$$

Die Anzahl der erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen in einem Kernkraftwerk während des Normalbetriebes ist nicht bekannt. Es wird davon ausgegangen, dass der Beitrag zur Entstehung von Bränden aufgrund von Instandhaltungsarbeiten über alle Orte des Kernkraftwerkes gleich verteilt ist. Dabei werden nur die Räume einbezogen, in denen tatsächlich Instandhaltungsarbeiten während des Betriebes möglich sind (beispielsweise wurden 664 Örtlichkeiten für die Anlage Blayais, Block 1 gezählt). Die Anzahl dieser Orte für alle französischen Kernkraftwerke wird mit $\#(Inst.haltungsorte)$ bezeichnet;

$\#_{KKW}(Inst.haltungsorte)$ bezeichnet die entsprechende Anzahl für ein konkretes Kernkraftwerk.

Fasst man die Brandeintrittshäufigkeiten für die technischen Referenzgruppen und für die menschlichen Eingriffe zusammen, ergibt sich für die Brandeintrittshäufigkeit eines betrachteten Kernkraftwerkes im Normalbetrieb:

$$H^{KKW}(Normalbetrieb) = \sum_i H^{KKW}(i,0) + H(16,1) \cdot \frac{\#_{KKW}(Inst.haltungsorte)}{\#(Inst.haltungsorte)}.$$

- *Brandeintrittshäufigkeit bei Nichtleistungsbetrieb (Zustände b, c, d, e):*

Für die technischen Referenzgruppen wird ein Bezug zur Gesamtdauer der Zustände b bis c hergestellt. Es ergibt sich für die Eintrittshäufigkeit über alle technischen Referenzgruppen bei den angegebenen Betriebszuständen:

$$\sum_i H^{KKW}(i,0) \cdot \frac{D}{8460}.$$

In /IPS 00/ wird zusätzlich die Brandeintrittshäufigkeit HM bei Nichtleistungsbetrieb und Instandhaltungsmaßnahmen abgeschätzt. Dabei wird von folgenden Referenzhäufigkeiten ausgegangen. Während der Betriebszustände c, d und e sind laut Statistik (vgl. Tabelle 3.5) 31 Brände aufgetreten, d.h. die Referenzhäufigkeit ergibt sich aus $31/508.2 = 6.1 \text{ E-2/Reaktorjahr}$. Die Referenzhäufigkeit im Bezug auf den Betriebszustand b ergibt sich dagegen aus $0.7/508.2 = 1.4 \text{ 3/Reaktorjahr}$, da im Auswertungszeitraum keine Brandereignisse im Betriebszustand b aufgetreten sind. Diese Referenzhäufigkeiten werden entsprechend dem Vorgehen der Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten durch Instandhaltungsmaßnahmen im Leistungsbetrieb mit der Anzahl von Räumen, in denen Instandhaltungsmaßnahmen stattfinden können, gewichtet und zu HM aufsummiert.

Fasst man die Brandeintrittshäufigkeiten für die technischen Referenzgruppen und für die menschlichen Eingriffe zusammen, ergibt sich für die Brandeintrittshäufigkeit des betrachteten Kernkraftwerkes im Nichtleistungsbetrieb:

$$H^{KKW}(\text{Nichtleistungsbetrieb}) = HM + \sum_i H^{KKW}(i,0) \cdot \frac{D}{8460}$$

- **Zusammenfassung**

Zur Bestimmung der Brandeintrittshäufigkeit für ein Kernkraftwerk in Frankreich ist es zuerst erforderlich, die Anzahl der Ausrüstungen $E(i,j)$ zu zählen. Dann können vorgefertigte Formblätter genutzt werden, um die Eintrittshäufigkeit entsprechend den zuvor beschriebenen Formeln zu errechnen. Die Formblätter sind in /IPS 00/ vorgegeben.

Die französische Vorgehensweise ist ein Beispiel für eine statistische Herangehensweise bei der Bestimmung von Eintrittshäufigkeiten. Die Brandeintrittshäufigkeit eines Kernkraftwerkes wird dabei durch die Anzahlen der Referenzgruppen im Kraftwerk bestimmt. Aus der dazu verfügbaren Literatur /IPS 00/ wird nicht deutlich, wozu die jährliche Brandeintrittshäufigkeit eines Kernkraftwerkes verwendet werden soll. Insgesamt scheint die beschriebene Vorgehensweise nur für solche Länder geeignet zu sein, bei denen wie in Frankreich eine große Anzahl baugleicher Kernkraftwerksblöcke vorhanden ist. In diesem Fall kann über die Brandeintrittshäufigkeit und weitere Indikatoren ein Vergleich der verschiedenen Kernkraftwerke durchgeführt werden. Dies stellt jedoch ein sehr aufwendiges und bei nur wenigen vorhandenen Anlagen gleichen Typs nur schwer realisierbares Vorgehen (siehe auch /TUE 02/) dar.

Für die im folgenden Kapitel 3.4 dargestellte systematische Vorgehensweise zur Bestimmung der anlagenspezifischen Brandeintrittshäufigkeit für ausgewählte Räume in deutschen Kernkraftwerken sind aber wegen der zum Teil doch starken Ähnlichkeit französischer und deutscher Gegebenheiten vor allem die vorhandenen französischen Daten von Bedeutung. Dies gilt umso mehr, da Frankreich über eine erheblich größere Betriebserfahrung, unter anderem auch im Hinblick auf Brände in Kernkraftwerken, verfügt.

Bei der Berechnung des raumspezifischen Modells zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten von Entstehungsbränden (vgl. dazu Kapitel 3.4) können die Häufigkeiten $H(i,j)$ der Referenzgruppen aus Tabelle 3.6 als gut fundierte generische Häufigkeiten genutzt werden, wenn ein Bezug zur Einzelkomponente hergestellt werden kann.

3.4 Systematische Vorgehensweise zur Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten

3.4.1 Methode

Im Rahmen einer probabilistischen Brandrisikoanalyse sind die folgenden Arbeitsschritte durchzuführen:

- Auswahl relevanter Brandbereiche (screening),
- Durchführung brandspezifischer Detailanalysen für alle zuvor ausgewählten Raumbereiche, sowie
- Einbindung der brandspezifischen Ergebnisse in eine vorhandene, eventuell zu erweiternde PSA.

Die Durchführung von brandspezifischen Detailanalysen und deren Einbindung in eine PSA schließt die Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten für alle durch das Auswahlverfahren identifizierten Räume bzw. Raumbereiche ein. Diese Häufigkeiten sind unter Einbeziehung aller relevanten Informationen generischer und anlagenspezifischer Art abzuschätzen (best estimate). Für die Eintrittshäufigkeiten sind sowohl Punktwerte als auch Unsicherheitsmargen anzugeben.

Das Ausgangsproblem derartiger Abschätzungen wurde bereits zuvor diskutiert: Für die Bestimmung einer Eintrittshäufigkeit für Entstehungsbrände in einem Raum bzw. Raumbereich lässt sich kein vorgefertigtes, schematisch abzuarbeitendes Vorgehen ableiten. Jeder Raum eines Kernkraftwerkes hat seine Besonderheiten, jeder Raum ist insofern einzigartig. Die brandspezifischen Einflussgrößen und deren Beziehungen untereinander sind hingegen von Raum zu Raum verschieden.

Nachfolgend wird ein systematisches Verfahren zur Bestimmung der benötigten Eintrittshäufigkeiten in vier Schritten (siehe Abbildung 3.2) vorgeschlagen. Jeder dieser Schritte wird diskutiert und, soweit möglich standardisiert. Weiterhin werden erste Hilfestellungen für die praktische Umsetzung dieser Vorgehensweise gegeben.

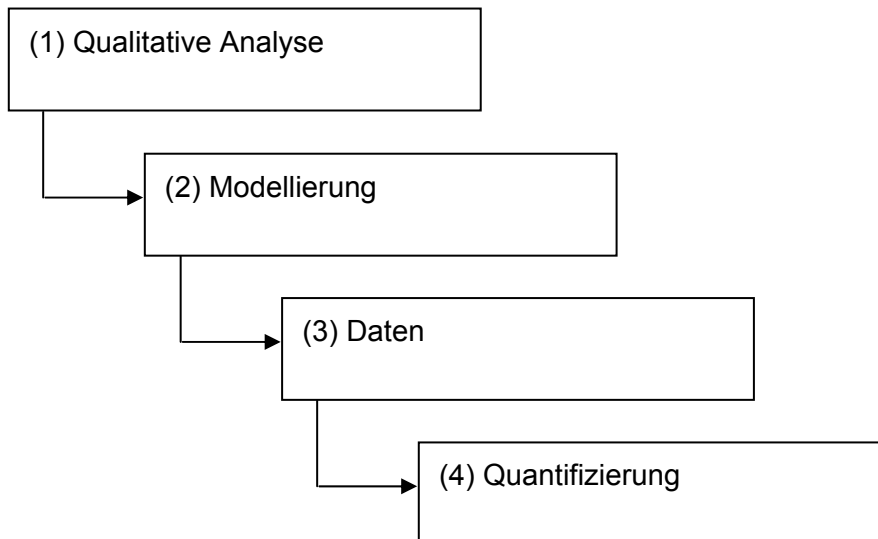


Abb. 3.2 Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten

(1) Qualitative Analyse

Im ersten Schritt des Verfahrens kann auf den brandspezifischen Informationen zu den einzelnen Räumen aufgebaut werden, die im Auswahlverfahren /FAS 01/ zusammengestellt wurden. Ziel dieses qualitativen Arbeitsschrittes ist es, die schon vorhandenen Informationen für die nun ausgewählten kritischen Räume bzw. Raumbereiche zu vertiefen, um anschließend ein realitätsnahes Modell zur Beschreibung der Zusammenhänge im Hinblick auf die Brandeintrittshäufigkeit aufstellen zu können. Die Informationssammlung für die qualitative Analyse sollte dabei allerdings gleich so durchgeführt werden, dass auch die benötigten Daten für eventuell erforderliche Brandsimulationsrechnungen und die Aufstellung des brandspezifischen Ereignisbaumes mit erfasst werden.

Die Informationen sollten folgendes umfassen:

- Raumeigenschaften

Größe und freies Volumen des Raumes, bauliche bzw. bautechnische Raumstrukturen und deren Anordnung, sonstige Informationen zur Raumgeometrie.

Insbesondere sollten Anordnung und Anzahl von Durchführungen durch den jeweiligen Raum bzw. Raumbereich (Rohr-, Kabel-, Lüftungs- und sonstige Durchführungen) sowie die Qualität der entsprechenden Abschottungen beschrieben werden.

- Rauminventar

Der Umfang der hier benötigten Informationen zum Inventar des Raumes bzw. Raumbereiches geht über die geforderte Inventarliste des Auswahlverfahrens hinaus. Dort war nur die Kenntnis zu wesentlichen betrieblichen und sicherheitstechnischen Einrichtungen erforderlich, in diesem Fall handelt es sich um eine vollständige Aufstellung aller im Raum vorhandenen Einrichtungen, ihrer Eigenschaften und ihrer räumlichen Anordnung.

- Brandlasten

Die Liste der im jeweiligen Raum bzw. Raumbereich vorhandenen Brandlasten ist zu überprüfen. Besonderes Augenmerk ist auf potentielle Brandlasten (z. B. brandgutführende Leitungen) und nur temporär (z. B. bei Nichtleistungsbetrieb oder Instandhaltungsarbeiten) vorhandene Brandlasten zu richten. Wurde beim Auswahlverfahren die Brandbelastung, d.h. die Brandlastmenge pro Grundfläche des Raumes, nur pauschal angegeben, ist diese jetzt für die detailliert zu untersuchenden Räume bzw. Raumbereiche zu konkretisieren: Welche Brandgüter sind in welcher Menge vorhanden? Wie sind die Brandlasten räumlich angeordnet? Welche Mengen der vorhandenen Brandlasten sind in welcher Form brandschutztechnisch geschützt, d.h. abgeschottet bzw. gekapselt (z. B. Beschichtung von kunststoffummantelten Kabelbrandlasten mit Dämmschichtbildnern)?

- Lüftung

Wie sind die Lüftungstechnischen Gegebenheiten im zu untersuchenden Raum bzw. Raumbereich (z. B. durchschnittliche Raumtemperatur, Angabe der Zu- und Abluftrate in m^3/h , Anordnung der Ventilatoren, Art und Funktion von Rauch- und Wärmeabzugsklappen)? Gibt es administrative Vorschriften zum Betrieb der Lüftung im Brandfall (z. B. manuelle Abschaltung)?

- Raumnutzung

Gibt es Unterschiede in der Nutzung des Raumes in Abhängigkeit vom Betriebszustand der Anlage mit Einfluss auf die Möglichkeiten einer Brandentstehung?

(2) Modellierung

Auf der Grundlage der in Arbeitsschritt (1) gesammelten Informationen ist ein probabilistisches Modell zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeit eines Entstehungsbrandes für den zu untersuchenden Raum bzw. Raumbereich aufzustellen. Die Komplexität des

Modells ist dabei abhängig von den in der qualitativen Analyse gefundenen Raumeigenschaften (bezogen auf potentielle Zündmöglichkeiten).

Kann ein Entstehungsbrand beispielsweise nur von einer Komponente im Raum ausgehen und liegen genügend statistische Daten vor, die diese Komponente bzw. diesen Komponententyp als brandauslösend charakterisieren, genügt ein einfacher statistischer Modellansatz zur direkten Abschätzung der Eintrittshäufigkeit. Liegen keine ausreichenden Daten für diese Komponente vor, kann eine Fehlerbaumanalyse durchgeführt werden. In diesem Fall wird dann untersucht, welche inneren Zündmechanismen der Komponente zu einem Entstehungsbrand führen können. Ein derartiges Vorgehen wurde beispielsweise in /HAI 02a/ bei der Bestimmung der Brandeintrittshäufigkeit eines elektrischen Verteilerschranks gewählt. In /GRS 93/ musste zunächst die Häufigkeit von Ölleckagen im Raum bestimmt werden, um dann zusammen mit der bedingten Zündwahrscheinlichkeit die Häufigkeit für einen Entstehungsbrand bestimmen zu können.

Spielen mehrere Aspekte bei den Entzündungsmöglichkeiten eine Rolle, so können durchaus Mischungen von mehreren Modellen angemessen sein. Insbesondere ist immer die Möglichkeit einzubeziehen, dass fehlerhafte Handlungen des Personals zu Entzündungen führen können. Das ist insbesondere bei möglichen Instandhaltungsarbeiten zu beachten. Nachfolgend wird versucht, eine grobe Ablaufbeschreibung als Entscheidungshilfe bei der Modellentwicklung zu geben (vgl. Abbildung 3.3).

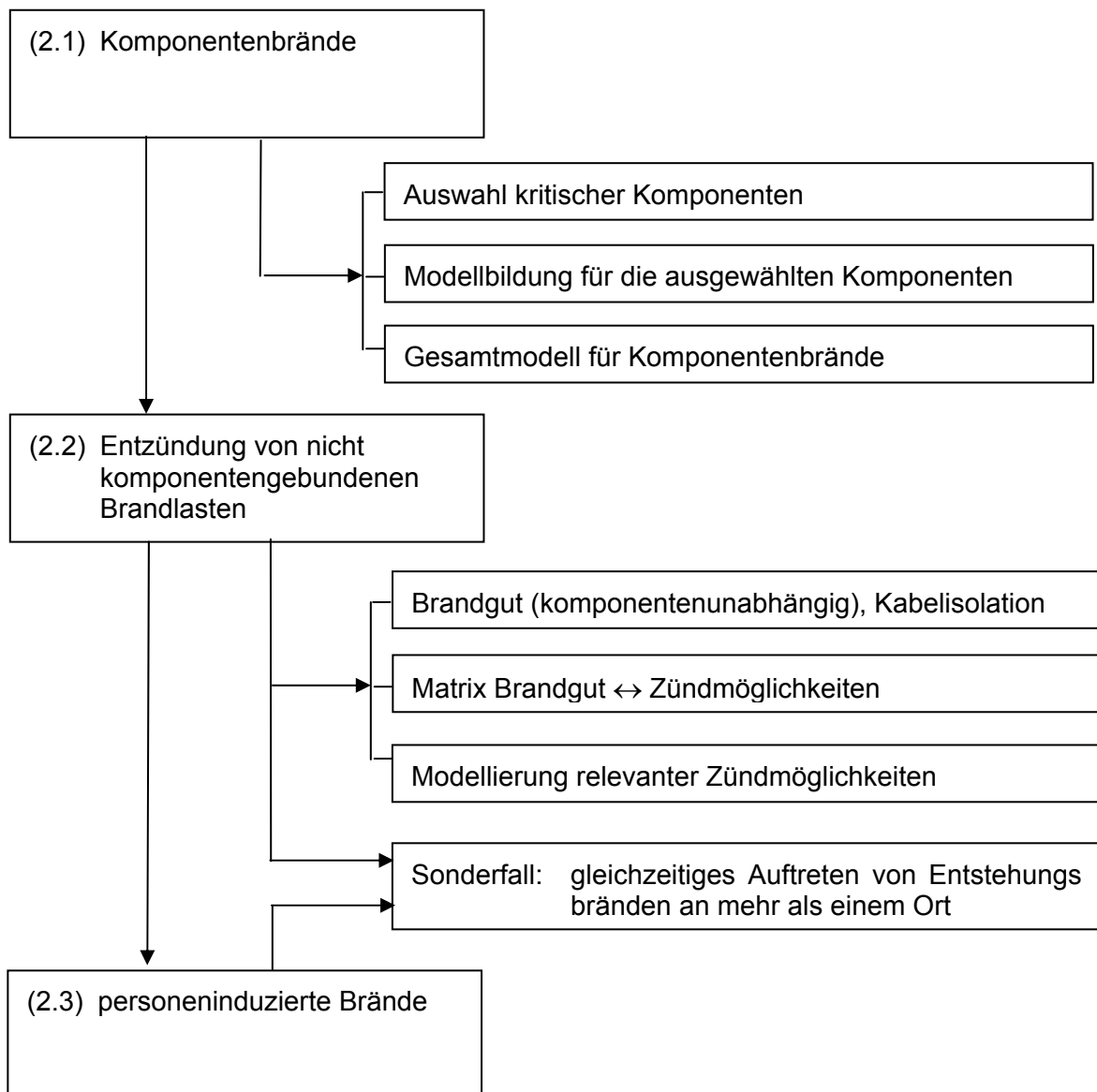


Abb. 3.3 Modellbildung zur Brandentstehung

Es sind drei Fälle einer Brandentstehung zu unterscheiden:

(2.1) Brandentstehung an Komponenten des Raumes

- Auswahl kritischer Komponenten
Komponenten werden als kritische Komponenten bezüglich der Brandentstehung bezeichnet, wenn die nationale oder internationale Betriebserfahrung zeigt, dass diese Komponentenart schon mindestens einmal als Brandherd aufgetreten ist)

- Welche Komponenten gibt es im Raum?
- Welche der Komponenten sind bzgl. der Brandentstehung als kritisch zu betrachten?

Ausgehend von der französischen Betriebserfahrung (siehe Tabelle 3.6) und den Erfahrungen in deutschen Kernkraftwerken sind unter anderem folgende Komponenten kritisch (Liste ist nicht vollständig):

- Hochspannungseinrichtungen
- Turbine
- Dieselgenerator
- Batterien
- Wechselrichter
- Gleichrichter
- Transformatoren
- Schaltschränke
- Leittechniksschränke
- Motoren
- Motorpumpen
- Lüfter / Gebläse
- Betriebsart der Komponenten

- Betriebsart der Komponenten

Der Einfluss der Betriebsart von Komponenten auf die Möglichkeit der Brandentstehung ist zu untersuchen. Das spielt insbesondere eine Rolle, wenn zwischen Brandeintrittshäufigkeiten bei Leistungsbetrieb und bei Nichtleistungsbetrieb unterschieden werden muss.

- Aufstellung von Modellen zur Bestimmung der komponentenbezogenen Brandhäufigkeit für kritische Komponenten
 - Welche generischen Daten können für die kritische Komponente als a priori-Informationen genutzt werden?
 - Gibt es anlagenspezifische brandrelevante Erkenntnisse zur Komponente?
 - Ist aufgrund der vorhandenen Daten ein einfacher statistischer Zugang (klassische statistische Schätzverfahren, Methodik von Bayes) zur Berechnung der komponentenbezogenen Brandeintrittshäufigkeit möglich?
 - Ist die Aufstellung eines Komponentenmodells erforderlich, in welchem mehrere interne Brandentstehungsmöglichkeiten verknüpft werden?
- Aufstellung des Modells zur Bestimmung der Brandhäufigkeit im Raum aufgrund komponentenbezogener Brände

(2.2) Brandentstehung durch Zündung von (nicht komponentengebundenen) Brandlasten

- Welche Komponenten gibt es im Raum?
- Welche der Komponenten können als potentielle Zündquellen wirken?
- Sind Instandhaltungsarbeiten im Raum möglich? Welche Arbeiten mit Zündpotential werden durchgeführt (Schweißen, Schneiden, etc.)?
- Welche Brandgüter gibt es im Raum?
Die Brandgüter sind wie folgt zu klassifizieren: In 'immer im Raum vorhanden' bzw. 'nur temporär vorhanden'. Bei temporär vorhandenen Brandlasten ist zu unterscheiden zwischen solchen, die aufgrund von Instandhaltungsmaßnahmen zeitweilig im Raum vorhanden sind (zeitweilige Lagerung von Brandgütern, wie z. B. Gerüste und Absperrungen) und solchen, die aufgrund von Betriebsstörungen an den Einrichtungen und Komponenten im Raum auftreten können. Zu letzteren gehören zum Beispiel Leckagen an Ölleitungen oder H₂-Freisetzungen.
- Berücksichtigung möglicher Begünstigungen der Brandentstehung durch Umgebungsbedingungen
Hierunter sind beispielsweise Temperaturerhöhungen im Raum aufgrund von ausgefallenen Lüftungsanlagen zu verstehen.
- Brandentstehung an Kabelisolationsmaterialien (Selbstentzündung durch Kabelfehler oder durch Überlastung)
In diesem Zusammenhang ist der Verweis auf ein Ereignis im Kernkraftwerk Ignalina von Interesse /NOW 01, S. 18/. Dort fand eine Selbstentzündung eines Kabels in einem Stromkreis mit Spannungen von weniger als 220 V statt.
- Aufstellung einer Matrix der Wechselwirkungen zwischen Brandlasten und potentiellen Zündmöglichkeiten
- Modellierung der Häufigkeit der Zündmöglichkeiten
- Sonderfall: mehrfache gleichzeitige Entstehungsbrände
In /NOW 01, S. 20/ sind Brandereignisse aufgeführt, bei denen es durch Fehler in elektrischen Stromkreisen zur gleichzeitigen Brandentstehung in mehreren Räumen kommt.

(2.3) Brandentstehung durch menschliches Fehlverhalten

- Wie viele Personen halten sich wie oft im Raum auf?
- Welche Tätigkeiten werden im Raum durchgeführt (Leistungsbetrieb, Nichtleistungsbetrieb)?
- Können fehlerhaft durchgeführte Instandhaltungsarbeiten zu zusätzlichen Zündmöglichkeiten führen (Beispiel: Beschädigung einer Flanschverbindung an der Anhebeölleitung einer Hauptkühlmittelpumpe während einer Revision führte aufgrund einer Ölleckage zum Brand)?
- Sonderfall: mehrfache gleichzeitige Entstehungsbrände
Im Kernkraftwerk Robinson (USA) wurde bei Wartungsarbeiten eine Hochdruck-Wasserstoffversorgung fälschlicherweise mit dem Lüftungssystem des Kernkraftwerks verbunden /NOW 01/. Dadurch entstanden im Maschinenhaus mehrere kleine Entstehungsbrände an verschiedenen Orten.

Das endgültige Modell zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeit von Entstehungsbränden im Raum umfasst die Ergebnisse der Modellierungen aus den Punkten (2.1) bis (2.3).

(3) Daten

Das Problem der Daten kann nicht getrennt von der Modellierung gesehen werden. Die erforderliche Modellierungstiefe ist abhängig von den zur Verfügung stehenden Daten. In einigen Fällen wird es mangels genügend verfügbarer Daten erforderlich sein, auf Expertenschätzungen zurückzugreifen.

An generischen Datenquellen oder Einzeluntersuchungen sind bislang verfügbar:

- **Auswertung der deutschen Betriebserfahrung**

Die deutsche Betriebserfahrung wurde schon nach verschiedenen, auch brand-spezifischen Gesichtspunkten ausgewertet (z. B. /ROE 97/, /ROE 99/, /ROE 00/, /ROE 01/).

Seit 1971 wurden bis Ende Mai 2001 25 Brände während des kommerziellen Betriebs von deutschen Kernkraftwerken, das sind ungefähr 594 Reaktorjahre, als meldepflichtige Ereignisse eingestuft. Diese Datenbasis ist, verglichen beispielsweise mit der französischen Betriebserfahrung (202 Ereignisse in 508 Reaktorjahren), nicht sehr umfangreich und für die Bestimmung lokaler Brandeintritts-

häufigkeiten kaum hilfreich. Die großen Unterschiede ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Meldekriterien. Für die Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten sind auch kleinste Entstehungsbrände unterhalb der Meldeschwelle von Bedeutung. Insofern wird empfohlen, eine detaillierte Auswertung der deutschen Betriebserfahrung nicht nur der meldepflichtigen, sondern auch nicht gemeldeter Entstehungsbrände in Hinblick auf die Brandentstehung durchzuführen und die Brandereignisse entsprechend der im vorliegenden Bericht beschriebenen Modellbildung zu klassifizieren.

Für die gemeldeten Brandereignisse kann zum Entstehungsort und zur Brandart folgendes festgestellt werden:

Von den insgesamt 25 aus Kernkraftwerken im kommerziellen Betrieb gemeldeten Bränden ereigneten sich 3 Brände im Reaktorgebäude, 8 Brände im Schaltanlagegebäude, 3 Brände im Hilfsanlagegebäude sowie 8 Brände im Maschinenhaus. Ein Brand trat im Notstromdieselgebäude auf. Zwei weitere Brandereignisse ereigneten sich in anderen Anlagenbereichen.

Von den 25 Bränden waren 13 Brände an elektrischen Einrichtungen, 6 Ölbrände, 4 Wasserstoffbrände und zwei Brände an mechanischen Einrichtungen.

– **Auswertung der französischen Betriebserfahrung**

In Kapitel 3.3.3 wurde die französische Methode zur Bestimmung von Brandeintrittshäufigkeiten für Kernkraftwerke zusammenfassend dargestellt. Die in Tabelle 3.4 enthaltenen Eintrittshäufigkeiten sind als generische Daten für Großkomponenten anwendbar, wenn - wie in Kapitel 3.3.3 erläutert - die jeweilige Anzahl der Großkomponenten in französischen Kernkraftwerken bekannt ist. Es ist davon auszugehen, dass diese Daten in nächster Zeit veröffentlicht werden und damit zu einer Auswertung zur Verfügung stehen.

– **Auswertung der amerikanischen Betriebserfahrung**

Die aus der amerikanischen Literatur bekannten Auswertungen der Betriebserfahrungen zu brandspezifischen Aspekten sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Eine Nutzung dieser Daten zur Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten mittels top down-Verfahren kann nicht empfohlen werden (siehe auch Kapitel 3.3.3). Die Brandeintrittshäufigkeiten von Entstehungsbränden an Großkomponenten können als generische Orientierungswerte bei bottom up-Untersuchungen herangezogen werden. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass seit 1988 in den USA eine Vielzahl von probabilistischen Brandanalysen durchgeführt wurden (z. B. im Rahmen der in /NRC 97/ erläuterten IPEEE (*Individual Plant External Events Exa-*

minations). Neuere Ergebnisse sind beispielsweise in /HOU 97/ enthalten. Hier wurden zumindest die Brandereignisse in amerikanischen Kernkraftwerken bis 1994 berücksichtigt.

- **US-amerikanische Auswertung von 25 international in Kernkraftwerken aufgetretenen Brandereignissen (nach /NOW 01/)**

In /NOW 01/ wurden 25 weltweit in Kernkraftwerken aufgetretene Brandereignisse mit sicherheitstechnischer Bedeutung vertieft von der USNRC ausgewertet. Dabei wurden insbesondere Erkenntnisse zur Ableitung von brandspezifischen Ereignisbäumen einschließlich der Frage nach den Eintrittshäufigkeiten abgeleitet.

Die durchgeführten Recherchen haben gezeigt, dass die vorliegenden Verweise auf generische Datenquellen nicht befriedigend sind. Andererseits wird aufgrund der in /HAI 02a/ vorgeschlagenen Vorgehensweise bei probabilistischen Brandrisikoanalysen für Kernkraftwerke die Anzahl der Räume, für die detaillierte Angaben zur Brandeintrittshäufigkeit erforderlich sind, vergleichsweise gering sein. Dementsprechend ist der Aufwand nicht gerechtfertigt, allgemeine Datenbanken aufzubauen und vorzuhalten, um für diese Fälle dann kurzfristig derartige Bewertungen vornehmen zu können. Vielmehr sollte der zeitliche Rahmen der probabilistischen Brandgefahrenanalysen so abgesteckt sein, dass die Möglichkeit einer individuellen, konkreten Datenrecherche für die aktuell benötigten Zusammenhänge besteht. In diesem Zusammenhang sollten auch brandspezifische Datensammlungen aus Brandereignissen im nichtnuklearen Industriebereich genutzt werden.

(4) Quantifizierung

Der letzte Arbeitsschritt ist mehr formaler Natur. Im Arbeitsschritt (2) wurde das Modell zur Berechnung der Eintrittshäufigkeit festgelegt. Im Arbeitsschritt (3) wurden die benötigten Modellparameter auf der Grundlage der vorhandenen Daten bestimmt. Die Brandeintrittshäufigkeit und die entsprechenden Unsicherheitsangaben für den entsprechenden Raumbereich können somit abschließend mit der entsprechenden Software, die eventuell problemabhängig modifiziert werden muss, berechnet werden.

3.4.2 Beispiel

Es ist an dieser Stelle nicht möglich, die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Methode zur Bestimmung von lokalen Brandeintrittshäufigkeiten vollständig an einem Beispiel zu

demonstrieren. Dazu muss auf ein anderes Vorhaben verwiesen werden. Gegenwärtig wird im Rahmen des BMU-Vorhabens SR 2418 an einer probabilistischen Brandanalyse für eine Anlage im Nichtleistungsbetrieb gearbeitet. Im Verlauf dieses Vorhabens wird es nach Durchführung des Auswahlverfahrens und nach Festlegung brandrelevanter Räume erforderlich sein, lokale Brandeintrittshäufigkeiten zu bestimmen. Dabei wird erstmals die hier beschriebene Methode umfassend angewendet.

Trotzdem wird nachfolgend versucht, die Arbeitsschritte der Methode beispielhaft zu veranschaulichen. Dabei wird - soweit möglich – auf die durchgeführten Analysen in /HAI 02a/ zurückgegriffen.

(1) Qualitative Analyse

Es bestand die Aufgabe, eine probabilistische Brandanalyse für eine Druckwasserreaktoranlage moderner Bauart durchzuführen. Dabei wurde erstmals das in Kapitel 2 beschriebene Auswahlverfahren angewendet. Mit diesem Verfahren werden solche Räume bestimmt, von denen aufgrund der vorhandenen primären brandrelevanten Informationen angenommen werden muss, dass im Fall eines dortigen Brandes Schäden auftreten, die signifikant zur Kernschadenshäufigkeit beitragen könnten. In der Beispielanalyse ergab sich ein relativ hohes brandbedingtes Schadenspotential für den ausgewählten Raum im Sicherheitsbehälter. Für diesen Raum waren dann brandspezifische Detailanalysen durchzuführen. Dazu gehören Brandsimulationsrechnungen, die Ableitung des brandspezifischen Ereignisablaufdiagramms und - nicht zuletzt - die Bestimmung der lokalen Brandeintrittshäufigkeit.

Die im vorliegenden Bericht beschriebene Methode sieht im Arbeitsschritt (1) „Qualitative Analyse“ vor, die im Auswahlverfahren zusammengestellten Informationen zu vertiefen und zu ergänzen. Dieser Schritt wurde im Beispielfall nur im Hinblick auf die durchzuführenden Brandsimulationsrechnungen getan. In Hinblick auf die Brandeintrittshäufigkeit wurde festgelegt, dass der Brand in einem elektrischen Verteilerschrank des Raumes entsteht. Andere Möglichkeiten der Brandentstehung wurden nicht betrachtet.

(2) Modellierung

Nach der in Kapitel 3.4 beschriebenen Methode sind drei Fälle der Brandentstehung zu unterscheiden: Komponentenbrände (2.1), Entzündung von nicht komponentenge-

bundenen Brandlasten (2.2) und personalinduzierte Brände (2.3). Im Beispielfall wurden nur Komponentenbrände untersucht. Als kritische Komponenten wurden drei Verteilerschränke identifiziert.

Da keine brandspezifischen Ausfalldaten für Verteilerschränke vorhanden waren, konnte keine direkte Schätzung der Brandeintrittshäufigkeit vorgenommen werden. Mit einer Fehlerbaumanalyse wurde untersucht, welche inneren Zündmechanismen der Komponente zu einem Entstehungsbrand führen können. Die Verteilerschränke sind mit einem Handschalter und mehreren Klemmstellen ausgerüstet. Die Möglichkeit eines Brandbeginns in einem Schrank ist insbesondere durch zwei technische Möglichkeiten gegeben: Kurzschluss im Verteilerschrank und Erhitzung einer losen Klemmstelle. Ein Fehler am Schalter, der zu einer Brandentstehung führt, konnte im vorliegenden Fall praktisch ausgeschlossen werden. Unter Berücksichtigung von fehlerhaften Personalhandlungen (Kurzschlussalarm wird nicht bemerkt, Installationsfehler bei Aufstellung oder Umrüstung von Verteilerschränken) wurde ein Fehlerbaum zur Berechnung der Brandeintrittshäufigkeit aufgestellt.

(3) Daten

Für das betrachtete Beispiel beschränkt sich der dritte Arbeitsschritt der Methode „Daten“ auf die Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten der Basisereignisse des im Arbeitsschritt (2) aufgestellten Fehlerbaums. Daten für die technischen Möglichkeiten der Brandentstehung in einem Verteilerschrank konnten /BRE 99/ entnommen werden. Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten für Personalfehler wurden die Methoden und Daten aus /SWA 83/ und /FAK 97/ genutzt.

(4) Quantifizierung

Zur Quantifizierung wurde die Risiko- und Zuverlässigkeitssoftware „RiskSpectrum“ genutzt.

Als mittlere Brandeintrittshäufigkeit ergibt sich für die drei Verteilerschränke in dem ausgewählten Raumbereich ein Wert von 8.4 E-5/Jahr mit $(q_{0.05}, q_{0.95}) = (6.8 \text{ E-6/Jahr}; 3.2 \text{ E-4/Jahr})$ als Unsicherheitsintervall.

3.5 Zusammenfassung

Probabilistische Brandanalysen für Kernkraftwerke erfordern unter anderem Kenntnisse zu lokalen Eintrittshäufigkeiten von Entstehungsbränden.

Bereits bei der Vorauswahl kritischer Raumbereiche eines zu untersuchenden Gebäudes sind verschiedene brandrelevante Raumeigenschaften und -kenngrößen miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Eine dieser Kenngrößen betrifft die Eintrittshäufigkeit von Entstehungsbränden. Das bedeutet, bereits im Auswahlverfahren ist für jeden Raum des Gebäudes die entsprechende Eintrittshäufigkeit zu bestimmen. In Kapitel 2 wurde gezeigt, dass für diese aufwendige Arbeit so genannte top down-Verfahren am ehesten geeignet sind, da es bei der Vorauswahl kritischer Raumbereiche noch nicht um die detaillierte Bestimmung der Eintrittshäufigkeit für jeden Raum geht, sondern nur die Wichtung der Räume bezüglich dieser und anderer Kenngrößen als Grundlage für eine Expertenauswahl entscheidend ist.

Von wesentlicher Bedeutung ist die Bestimmung der Eintrittshäufigkeit eines Entstehungsbrandes vor allem für die ausgewählten kritischen Raumbereiche. Dabei ist es erforderlich, sämtliche anlagen- und raumspezifischen Kenntnisse in das entsprechende Modell einfließen zu lassen. Diese Aufgabe ist nur mit bottom up-Verfahren zu lösen. Im vorliegenden Bericht wird eine systematische Vorgehensweise zur Bestimmung der benötigten Eintrittshäufigkeiten in vier Schritten vorgeschlagen. Jeder dieser Schritte wurde diskutiert und, soweit möglich, standardisiert. Durch die Vielzahl der möglichen brandspezifischen Einflussgrößen und deren Kombinationen kann allerdings der Arbeitsschritt Modellierung (Aufstellung einer quantitativen Vorschrift zur Berechnung der Eintrittshäufigkeit) nicht durch eine umfassende Methode abgedeckt werden. Hier wird immer anhand der konkreten Raumeigenschaften, der technischen und brandphysikalischen Zusammenhänge in der vorhandenen Datenbasis im Einzelfall entschieden werden müssen, wie die Modellierung zu erfolgen hat.

Zur anlagenspezifischen Durchführung von probabilistischen Brandrisikoanalysen für deutsche Kernkraftwerke wird empfohlen, eine detaillierte Auswertung der deutschen Betriebserfahrung nicht nur der meldepflichtigen, sondern auch nicht gemeldeter Entstehungsbrände im Hinblick auf die Brandentstehung durchzuführen und die Brandereignisse entsprechend der im vorliegenden Bericht beschriebenen Modellbildung zu klassifizieren.

3.6 Definitionen, Bezeichnungen und Abkürzungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Bezeichnungen und Begriffsbestimmungen aus Kapitel 3 zusammengefasst.

Tab. 3.7 Definitionen, Bezeichnungen und Abkürzungen

Bezeichnung	Erläuterung
Brandeintrittshäufigkeit	Häufigkeit eines ($\rightarrow$) Entstehungsbrandes in einem ($\rightarrow$) Raumbereich
Entstehungsbrand	Anfangsphase eines Brandes, dessen Auswirkungen auf den Entzündungsort begrenzt sind.
kritischer Raumbereich	Ein ($\rightarrow$) Raumbereich wird als kritischer Raumbereich bezeichnet, wenn ein Brand in diesem Bereich das Potential hat, eine Transiente auszulösen und gleichzeitig Sicherheitsfunktionen unwirksam werden zu lassen /APO 93/
Raumbereich	Räumlicher Abschnitt in einem Gebäude; Ein Raumbereich wird in Abhängigkeit vom Untersuchungsziel durch die Angabe seiner Begrenzungen vorgegeben.
#	Anzahl $\#(Inst.haltungsorte)$ bezieht sich z. B. auf die Anzahl der möglichen Instandhaltungsorte in französischen KKW (siehe Kapitel 3.3.3.)
D	jährliche Dauer (in Stunden) der Betriebszustände b, c, d und e (vgl. Tabelle 3.4)
E	Die Referenzgruppe E gibt die technische Einrichtung an, die Brandausgangspunkt gewesen ist (französische Methode, vgl. Kapitel 3.3.3) $E(i,j)$ - i Klasse von Brandherden, j - Unterklasse (siehe Tabelle 3.5)
$H(i,j)$	Eintrittshäufigkeit von Bränden pro Reaktorjahr bezüglich Referenzgruppe $E(i,j)$ $H(i,j) = \begin{cases} \# Brände E(i,j) / T & \text{falls } \# Brände E(i,j) \neq 0 \\ 0,7 / T & \text{sonst} \end{cases}$
H, h	Eintrittshäufigkeit
h_i	Brandeintrittshäufigkeit für einen Raum i, i aus R (Menge aller Räume)
H^{KKW}	Brandeintrittshäufigkeit in einem spezifischen Kernkraftwerk (KKW) bei Leistungsbetrieb; H^{KKW} bezieht sich auf den gesamten Standort, $H^{KKW}(i,j)$ bezieht sich auf die Referenzgruppe $E(i,j)$

Bezeichnung	Erläuterung
HM	Brandeintrittshäufigkeit bei Nichtleistungsbetrieb und Instandhaltungsmaßnahmen
KSZ	Kernschadenzustand
N	Anzahl der Einrichtungen einer Referenzgruppe für eine Kraftwerks- serie (in Frankreich 900 MW bzw. 1300 MW Reaktoren); N(i,j) bezieht sich auf die Referenzgruppe E(i,j)
N^{KKW}	Anzahl der Einrichtungen einer Referenzgruppe für ein spezifisches Kraftwerk; N(i,j) bezieht sich auf die Referenzgruppe E(i,j)
R	Menge aller Räume
S1, S2, S3	brandbedingte Schadenszustände (vgl. Tabelle 3.1)
t	Betrachtungszeitraum, Betriebszeit (in Reaktorjahren, falls nichts anderes angegeben) t beträgt 508.2 Reaktorjahre für den ausgewerteten Zeitraum der französischen Betriebserfahrung

4 Berücksichtigung von Unsicherheiten bei Brandausbreitungsmodellen

4.1 Problemstellung

Im Rahmen von probabilistischen Brandanalysen ist die Wahrscheinlichkeit von Brandfolgen als Ausgangspunkt der systemtechnischen Ereignisabläufe zu bestimmen. Brandfolgen werden aus brandspezifischen Ereignisabläufen ermittelt. Zur Ableitung von brandspezifischen Ereignisabläufen sind Kenntnisse zur lokalen Brandeintrittshäufigkeit (siehe Kapitel 2), zur Brandalarmierung und zur Brandbekämpfung erforderlich, die zum Teil Brandsimulationsrechnungen voraussetzen. Ergebnisse moderner probabilistischer Analysen sind mit Unsicherheitsangaben zu versehen. Nachfolgend wird gezeigt, wie die Wahrscheinlichkeit von Brandfolgen zusammen mit Unsicherheits- und Sensitivitätsaussagen mit Hilfe der probabilistischen Dynamik aus einer Klasse von Brandereignissen ermittelt wird. Dazu werden bei der Anwendung eines deterministischen Rechenmodells, bestehend aus dem Dynamikmodell für Brandsimulationsrechnungen mit einem entsprechenden Reencode und einem Gegenmaßnahmenmodell, sowohl stochastische Einflüsse als auch Kenntnisstandsunsicherheiten berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Folgen eines Kabelbrandes innerhalb des Sicherheitsbehälters der Referenzanlage als ausgewähltem Szenario wird neben der Eintrittshäufigkeit die bedingte Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten bestimmter Grenztemperaturen benötigt. Die nachfolgende Analyse soll dementsprechend unter anderem Fragen folgender Art beantworten:

- Wie ist der zeitliche Verlauf der Temperatur bei einem von einem elektrischen Verteilerschrank ausgehenden Kabelbrand innerhalb des Sicherheitsbehälters?
- Wie hoch ist die maximale Temperatur bei einem solchen Kabelbrand?
- Wie lange stehen bei einem derartigen Kabelbrand Temperaturen über einer bestimmten Temperatur an?

Da sich diese Fragen nicht auf ein bestimmtes Kabelbrandereignis innerhalb des Sicherheitsbehälters der Referenzanlage beziehen, gibt es nicht nur einen Zeitverlauf oder einen Maximalwert etc., der diese beantworten würde.

Die Antwort kann vielmehr nur jeweils eine Wahrscheinlichkeitsverteilung sein, welche die Variabilität (z. B. der maximalen Temperatur) über viele derartige Kabelbrandereignisse summarisch darstellt. Alles, was zu dieser Variabilität beiträgt, wird als „aleatorische“ Größe (oder auch „stochastische Größe“) bezeichnet. Alles, was über die Kabelbrandereignisse hinweg gleich (oder annähernd gleich) aber ungenau bekannt ist und damit nicht die genaue Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung erlaubt, hat die Bezeichnung „epistemische Größe“ (oder auch „Kenntnisstandgröße“).

Aufgrund der epistemischen Größen können die bedingten Wahrscheinlichkeiten bezüglich der zuvor genannten Fragen nur ungenau ermittelt werden, d.h. es kommt im Zuge der Unsicherheitsanalyse zu einer subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung für diese bedingte Wahrscheinlichkeit.

Damit sind beispielsweise Aussagen möglich wie:

„Mit einer subjektiven Wahrscheinlichkeit von 0.95 liegt die (bedingte) Wahrscheinlichkeit, mit der bei einem von einem elektrischen Verteilerschrank ausgehenden Kabelbrand die Temperatur von x °C überschritten wird, nicht über p_{95} .“

Für eine Punktrechnung kann dann der Erwartungswert der Überschreitenswahrscheinlichkeit aus der subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt werden.

Die Verbesserung des Kenntnisstandes zu den epistemischen Größen reduziert die Ergebnisunschärfe und beeinflusst damit die subjektive Wahrscheinlichkeit, aber nicht die zutreffende Überschreitenswahrscheinlichkeit. Letztere kann nur durch Änderung der stochastischen Variabilität aus den aleatorischen Größen, also durch Systemänderungen (d.h. Änderungen, durch die solche Kabelbrände seltener auftreten, die Brandmeldung zuverlässiger wird, etc.) beeinflusst werden.

4.2 Rechenmodell

Das verwendete Rechenmodell zum Brandverlauf besteht einerseits aus dem Dynamikmodell für die Brandsimulation und andererseits aus der Logik der Gegenmaßnahmen. Zur quantitativen Ermittlung der Brandwirkungen wird ein Brandsimulations-Mehrraum-Mehrzonenmodell CFAST [PEA 97] und [PEA 97a] in der Version 3.1.4 eingesetzt. Die Bezeichnung CFAST steht dabei für Consolidated Fire and Smoke Transport Model. Entwickelt wurde die Software am Fire Research Laboratory des

National Institute of Standards and Technology (NIST) der Vereinigten Staaten von Amerika.

Zunächst wird eine dynamische Brandsimulationsrechnung (Dynamikrechnung) mit CFAST durchgeführt und anschließend das Ergebnis dieser Rechnung im Modell der Gegenmaßnahmen berücksichtigt. Die Dynamikrechnung mit CFAST verläuft so, als ob keine Löschmaßnahmen ergriffen worden wären. Das Gegenmaßnahmenmodell berechnet in Abhängigkeit von der Temperatur zu Beginn der Löschmaßnahmen die Zeit, nach welcher sich der Löscherfolg einstellt. Zum Zeitpunkt des Löscherfolgs werden alle Temperaturen aus CFAST auf Umgebungstemperatur gesetzt.

Es wird davon ausgegangen, dass die wesentlichen Unsicherheiten der Ermittlung der dynamischen Brandentwicklung bei einem Kabelbrandereignis von epistemischer Natur, also Kenntnisstandunsicherheiten sind. Damit unterliegt die Dynamikrechnung mit CFAST allein epistemischen Unsicherheiten. Eine detaillierte Beschreibung dieser Kenntnisstandunsicherheiten findet man in /HAI 02a/ sowie in der Tabelle 4.2 in Kapitel 4.3.2.

Zu stochastischer Variabilität kommt es aufgrund des zufälligen Geschehens in den Bereichen automatische Brandmeldung, Warte, Rundgänger (Brandläufer), Erkunder, Löschrupp und Brandbekämpfung. Der Ablauf der Ereignisse in diesen Bereichen wird im Gegenmaßnahmenmodell simuliert. Die Logik des Gegenmaßnahmenmodells wird in Kapitel 4.5 beschrieben.

4.3 Analysewerkzeug

Die herkömmliche Unsicherheitsanalyse ermittelt den Einfluss von Kenntnisstandunsicherheiten in Parametern, Modellannahmen, Phänomenen sowie im Einsatz numerischer Lösungsalgorithmen auf das Ergebnis von Rechenmodellen. Solche Analysen werden mit dem Programmsystem „SUSA“ /KRZ 94/ und /KLS 99/ seit längerem mit Erfolg durchgeführt. Für Aussagen in der PSA ist jedoch zwischen Unsicherheit aufgrund stochastischer Variabilität (aleatorisch) und Kenntnisstandunsicherheit (epistemisch) zu unterscheiden. Aleatorische Unsicherheiten sind Ergebnisbestandteil der PSA, während epistemische Unsicherheiten bestimmen, wie genau die PSA-Aussagen getroffen werden können (siehe auch /NRC 98/, /PAR 96/ und /HOF 96/).

Um diese Trennung bei der Unsicherheitsanalyse methodisch effizient zu unterstützen, entstand eine um die Stochastik erweiterte Version des von der GRS entwickelten Programmsystems SUSAs (SUSA-AB) /KLS 00/.

Einsatzgebiet von SUSA-AB sind Anwendungen von deterministischen Rechenmodellen, wie beispielsweise CFAST, die bei einem geringen Prozessorzeitbedarf Ergebnisse für Teilaufgaben einer PSA liefern. Sie dürfen außerdem keine komplexen Abhängigkeiten der aleatorischen sowie der epistemischen Unsicherheiten von Rechenmodell-Zwischenergebnissen aufweisen. Im Falle eines Dynamikmodells dürfen also z. B. Lebensdauern technischer Komponenten und/oder der Kenntnisstand zu Verteilungsparametern nur in einfacher Form von der dynamischen Entwicklung der Prozessgrößen abhängen. Abhängigkeiten der Dynamik von den Stochastikeinflüssen und Kenntnisstandsunsicherheiten dürfen dagegen in beliebigem Maße bestehen.

4.3.1 Potentiell wichtige Unsicherheiten

Insgesamt wurden bei den Rechnungen für das Szenario eines in einem elektrischen Verteilerschrank beginnenden Kabelbrandes vierzehn potentiell wichtige aleatorische Größen identifiziert. Darunter sind die Funktion (oder Nichtfunktion) der im Brandbereich installierten automatischen Brandmelder 1, 2 und 3 sowie der zugehörigen Brandmeldelinie und des Einschubs der Brandmeldezentrale. Diese werden zu einer aleatorischen Größe (A18) zusammengefasst, nämlich das technische Brandmeldesystem mit den möglichen Zuständen „kein, genau ein, genau zwei, alle drei Melder können melden“. A18 geht nicht über eine Monte-Carlo-Simulation, sondern analytisch in die Ergebnisermittlung ein, d.h. durch Bildung der Mischung der zugehörigen Ergebnisverteilungen mit den entsprechenden Eintrittswahrscheinlichkeiten als Mischungsgewichte. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten sind die epistemischen Größen B34 bis B37 in Tabelle 4.3. Alle aleatorischen Größen sind zusammen mit den Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Abhängigkeiten zur Modellierung der stochastischen Variabilität in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Beispielsweise wurde für die Temperatur, ab der Störsignale anstehen, die Histogrammverteilung mit den Parametern in Zeile 5 von Tabelle 4.1 angesetzt.

Aufgrund dieser 14 aleatorischen Größen erhält man Wahrscheinlichkeitsverteilungen, beispielsweise für die Temperatur der Heißgasschicht zu beliebigen Zeitpunkten oder auch für das Maximum der Temperatur über alle Zeitpunkte.

In der Modellierung der stochastischen Variabilität dieser 14 aleatorischen Größen sowie in der Dynamikmodellierung des Kabelbrandverlaufs wurden insgesamt 86 potentiell wichtige epistemische Größen identifiziert. Die wesentlichen 33 epistemischen Größen sind mit den zugehörigen subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Modellierung des Kenntnisstandes in Tabelle 4.2 zusammengestellt. So entnimmt man beispielsweise Zeile 9 von Tabelle 4.2, dass der Kenntnisstand zur Versagenswahrscheinlichkeit des Brandmelders durch eine gestutzte Lognormal-Verteilung ausgedrückt wird. In Tabelle 4.3 sind Zwischengrößen bzw. abgeleitete epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen aufgelistet. Sensitivitätsmaße werden nur für die 33 epistemischen Größen in Tabelle 4.2 ermittelt. Identifizierte Kenntnisstandabhängigkeiten sind zusammen mit ihrer Quantifikation in den Tabellen 4.2 und 4.3 in der Spalte „Verteilungstyp“ zu finden.

4.3.2 Probabilistische Modellierungen

Modellierung der stochastischen Variabilität aleatorischer Größen

Zu allen in diesem Kapitel dargestellten Größen sind die Details der Modellierung in Tabelle 4.1 festgehalten.

Aleatorische Größe A5

A5 ist die reine Ansprechzeit der Brandmelder, sobald Rauch zu ihnen aufgestiegen ist. Die stochastische Variabilität dieser Zeitspanne wird durch eine Gleichverteilung ausgedrückt, bei der Minimum (epistemische Größe B16) und Maximum (epistemische Größe B17) ungenau bekannt sind.

Aleatorische Größe A6

Die automatisch auslösenden Brandmelder 1 und 2 sind etwa gleich weit vom elektrischen Verteilerschrank entfernt. A6 bezeichnet die Zeitspanne zwischen Brandbeginn im Verteilerschrank und dem Ansprechen der Melder 1 und 2. Diese Zeitspanne wird hier als für beide Melder gleich angenommen. Die Verteilung, welche die stochastische Variabilität dieser Zeitspanne modelliert, setzt sich zusammen aus einem konstanten aber ungenau bekannten Anteil (Zeit, die vergeht, bis der Rauch zu den Brandmeldern 1 und 2 aufgestiegen ist; epistemische Größe B15) und der Verteilung der stochastisch variablen Zeitspanne A5, die danach bis zum Ansprechen des Melders vergeht.

Aleatorische Größe A7

A7 bezeichnet die Zeitspanne zwischen Brandbeginn im Verteilerschrank und dem Ansprechen des Melders 3. Melder 3 ist vom Verteilerschrank ungefähr doppelt so weit entfernt wie die Melder 1 und 2. Für A7 wird deshalb die ungenau bekannte Zeit B15, die vergeht, bis der Rauch zu den Brandmeldern 1 und 2 aufgestiegen ist, verdoppelt und zur stochastisch variablen Zeitspanne A5 addiert.

Aleatorische Größe A8

Das Auftreten von durch den Brand verursachten Störsignalen in der Warte wird als stochastisches Ereignis aufgefasst. Das bedeutet, es kommt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (epistemische Größe B38) zu Störsignalen, mit der Komplementärwahrscheinlichkeit (epistemische Größe B39) bleiben diese Störsignale aus.

Aleatorische Größe A9

Treten Störsignale auf, so wird der Zeitpunkt, ab dem diese anstehen, als aleatorische Größe aufgefasst, welche von der Temperatur in der Heißgasschicht des Kontrollvolumens abhängig ist, in dem sich der elektrische Verteilerschrank als Zündquelle befindet. Die Temperatur der Heißgasschicht, ab welcher Störsignale anstehen, ist die hier betrachtete aleatorische Größe A9. Ihre stochastische Variabilität wird mittels einer bedingten (Voraussetzung ist, dass Störsignale auftreten) Histogrammverteilung mit zwei Stufen modelliert. Die Wahrscheinlichkeitsinhalte einer jeden der beiden Stufen sind fest, aber ungenau bekannt und werden dementsprechend als epistemische Größen B40 und B41 behandelt. Sie errechnen sich aus der Wahrscheinlichkeit dafür, dass überhaupt Störsignale auftreten (B38), und aus den entsprechenden ungenau bekannten Wahrscheinlichkeitsinhalten (B18 und B19) der unbedingten Verteilung (siehe Abbildung 4.1). Ebenso ist die Grenztemperatur zwischen dem Bereich der Temperaturen, ab denen mit niedriger Wahrscheinlichkeit Störsignale auftreten (beginnt bei 80 °C), und dem Bereich der Temperaturen, ab denen mit signifikant höherer Wahrscheinlichkeit Störsignale anstehen (endet bei 220 °C), ungenau bekannt. Sie ist die epistemische Größe B20. Unterhalb einer Temperatur von 80 °C wird angenommen, dass keine Störsignale auftreten.

Aleatorische Größe A10

Ein Rundgänger kommt etwa alle drei Stunden mit einer Abweichung von bis zu etwa 20 Minuten durch den betrachteten Raumbereich. Die Zeit nach Brandbeginn, zu welcher der Rundgänger eintrifft, ist eine aleatorische Größe. Ihre stochastische Varia-

bilität wird mittels einer Gleichverteilung zwischen 0 und einem ungenau bekannten Maximum, welches zwischen 9600 und 12000 Sekunden liegt, modelliert.

Aleatorische Größe A11

Bei Auslösung eines automatischen Brandmeldedetektors ist die Brandmeldung durch Personal (d.h. einen Erkunder), welches von der Warte vor Ort entsandt wird, zu verifizieren. Die Zeit, welche das Wartenpersonal benötigt, um auf einen Alarm durch nur einen automatischen Brandmeldedetektor zu reagieren (z. B. um den Erkunder zu entsenden, der prüfen soll, ob es sich um einen Brand oder nur um einen Fehlalarm des automatischen Brandmelders handelt), ist eine aleatorische Größe. Minimum und Maximum des Bereichs der stochastischen Variabilität sind ungenau bekannt und werden dementsprechend als epistemische Größen (B22 und B23) behandelt. Zwischen Minimum und Maximum wird jede mögliche Zeitspanne als gleich häufig vertreten beurteilt.

Aleatorische Größe A12

Die Zeit nach der Meldung durch nur einen automatischen Brandmelder, zu der ein Erkunder entsandt wird, ist eine aleatorische Größe. Sie setzt sich zusammen aus der Reaktionszeit des Personals in der Warte auf eine Brandmeldung durch nur einen automatischen Brandmeldedetektor (aleatorische Größe A11) und einer ungenau bekannten Verzögerungszeit der Warte bis zur Entsendung eines Erkunders (epistemische Größe B24). Die mögliche stochastische Variabilität dieser Verzögerungszeit des Wartenpersonals wird als vernachlässigbar beurteilt im Vergleich zur grundsätzlichen Unsicherheit über diese Zeit. Sie wird deshalb als epistemische Größe behandelt.

Aleatorische Größe A13

Das Ereignis, dass der Rundgänger den Brand erkennt, wenn noch kein automatischer Brandmeldedetektor meldet und noch keine Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind, ist zufällig. Die Wahrscheinlichkeit für die Branderkennung ist die epistemische Größe B12 (zwischen 0 und 0.25). Mit der entsprechenden Komplementärwahrscheinlichkeit (epistemische Größe B42) erkennt der Rundgänger den Brand nicht.

Aleatorische Größe A14

Das Ereignis, dass der Brand entweder vom Rundgänger oder vom Erkunder erkannt wird, wenn ein automatischer Brandmelder meldet und noch keine Flammen außerhalb des Schrankes sind, ist die aleatorische Größe A14. Die Wahrscheinlichkeit für die

Branderkennung ist ungenau bekannt (epistemische Größe B13 zwischen 0.25 und 0.75). Mit der Komplementärwahrscheinlichkeit (epistemische Größe B43) wird der Brand nicht erkannt.

Aleatorische Größe A15

Bei Brandmeldung durch zwei automatisch auslösende Brandmeldedetektoren wird Personal zur Brandbekämpfung vor Ort entsandt (so genannte Brandersthelfer, d.h. für erste Brandbekämpfungsmaßnahmen geschultes Schichtpersonal), zusätzlich wird die Werksfeuerwehr alarmiert. A15 bezeichnet das zufällige Ereignis, dass der Brand vom Rundgänger oder diesen Löschkraften erkannt wird, wenn bereits zwei automatische Brandmeldedetektoren melden aber noch keine Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind. Die Wahrscheinlichkeit für die Branderkennung in diesem Fall ist die epistemische Größe B13 (zwischen 0.25 und 0.75). Mit der Komplementärwahrscheinlichkeit (epistemische Größe B43) wird der Brand nicht erkannt.

Aleatorische Größe A16

Das zufällige Ereignis, dass der Brand vom Rundgänger oder den Löschkraften erkannt wird, wenn bereits drei Melder melden aber noch keine Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind, hat die ungenau bekannte Wahrscheinlichkeit B14 (zwischen 0.5 und 1). Mit der Komplementärwahrscheinlichkeit (epistemische Größe B44) wird der Brand nicht erkannt.

Aleatorische Größe A17

Die Zeit nach dem Auftreten von Störsignalen, zu der Rundgänger und Erkunder oder die Löschkraften zusätzlich zu einer Brandmeldung durch die automatischen Brandmeldedetektoren von der Warte aus über Störsignale informiert werden, wird als aleatorische Größe betrachtet. Sie wird in Bezug gesetzt zurzeit nach der Meldung durch nur einen automatischen Brandmelder, zu welcher der Erkunder informiert und entsandt wird (aleatorische Größe A12). Bei zusätzlich zur Meldung durch die Brandmelder auftretenden Störsignalen wird erwartet, dass die Warte entsprechende Informationen schneller weiterleitet, und zwar um einen ungenau bekannten Faktor zwischen 0.5 und 0.75 (epistemische Größe B27).

Modellierung des Kenntnisstandes zu epistemischen Größen

Zu allen in diesem Kapitel besprochenen Größen sind die Details der Modellierung den Tabellen 4.2 und 4.3 zu entnehmen.

Die nachfolgend besprochenen Parameter B1 bis B8 sind die als potentiell wichtig identifizierten epistemischen Größen bei der Anwendung des Brandsimulationsmodells CFAST /PEA 97/ und /PEA 97a/. Zur Gewinnung der subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen von B3 und B4 dienen die epistemischen Zwischengrößen B45 bis B86 mit ihren jeweiligen Verteilungen.

Parameter B1

Der Kenntnisstand zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes auf der unmittelbar an den elektrischen Verteilerschrank anschließenden vertikalen Kabeltrasse wird mittels einer Gleichverteilung über dem Intervall (2.4 cm/min, 3.6 cm/min) ausgedrückt.

Parameter B2

Der Kenntnisstand zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes auf der unmittelbar an die vertikalen Kabel anschließenden horizontalen Kabeltrasse wird mittels einer Gleichverteilung über dem Intervall (0.8 cm/min, 1.2 cm/min) ausgedrückt.

Parameter B3

Die Brandlast der vertikal aus dem elektrischen Verteilerschrank heraus führenden Kabel ist ungenau bekannt, weil einerseits Angaben über Anzahl und Art der Kabel fehlen und andererseits die Kabelbrandlasten (d.h. von den Kabelisolationsmaterialien) nur ungenau angegeben werden können. Die Anzahl der Kabel ist die epistemische Größe B45. Hinsichtlich Art und Brandlast der einzelnen Kabel wird der Kenntnisstand folgendermaßen ausgedrückt:

Aus einer Zusammenstellung möglicherweise verwendeter Kabelarten (siehe Tabelle 4.4) werden, mangels weiterer Informationen über den relativen Anteil der einzelnen vertikal verlaufenden Kabelarten, zufällig gemäß einer diskreten Gleichverteilung B45 Kabel ausgewählt. Aus einer Anlagenbegehung ist bekannt, dass nur Kabel mit vergleichsweise geringem Durchmesser vertikal aus dem Verteilerschrank heraus nach oben verlaufen. Die Auswahl aus Tabelle 4.4 beschränkt sich deshalb auf Kabel mit Durchmessern von weniger als 24 mm. In Tabelle 4.4 sind weiterhin auch Brandlasten für die einzelnen Kabeltypen angegeben. Die Monte-Carlo-Simulation wählt stets 12 Kabel (das Maximum von B45) zufällig aus Tabelle 4.4 aus und belegt die Parameter B46 bis B57 mit den dazu angegebenen Brandlasten. Für die Bildung der Summe B3 werden allerdings nur die ersten B45 verwendet. Die subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung von B3 ergibt sich somit aus der von B45 und der Verteilung der Brandlasten zu Kabeln mit Durchmesser kleiner 24 mm in Tabelle 4.4.

Parameter B4

Der Kenntnisstand zur Brandlast der Kabel auf der horizontalen Trasse wird ähnlich zu B3 quantifiziert. Aus der Anlagenbegehung ist bekannt, dass ein bestimmter, ungenau bekannter Anteil dickerer Kabel mit Durchmessern von 24 mm bis 30 mm auf dieser Trasse verläuft. Die Gesamtzahl der Kabel auf der horizontalen Trasse und die Anzahl der sich darunter befindlichen dicken Kabel ergeben die epistemischen Größen B58 bzw. B59. Der Kenntnisstand zur Kabelzusammensetzung auf der Trasse und damit zur gesamten Brandlast wird wie bei B3 aber unter Berücksichtigung der Unsicherheit über den Anteil dicker Kabel ausgedrückt. Für die individuellen Brandlasten der Kabel auf der horizontalen Trasse sind die Parameter B60 bis B86 vorgesehen, da es sich dabei um mindestens 16 und maximal 24 Kabel handelt, von denen mindestens 3 und höchstens 6 als dicke Kabel, d.h. solche mit vergleichsweise großem Querschnitt, bezeichnet werden.

Parameter B5

Die individuellen Brandlasten in Tabelle 4.4 sind Messwerte ohne Angaben zu Messfehlern. Da der Einfluss zufälliger Messfehler auf die Summe der Brandlastwerte als gering beurteilt wird, bleibt noch die Berücksichtigung einer eventuellen systematischen Abweichung zwischen den tatsächlichen und den angegebenen Brandlasten. Der Kenntnisstand hierzu wird durch eine Gleichverteilung über (0.8, 1.2) für einen unsicheren Korrekturfaktor B5 ausgedrückt. Demzufolge werden B3 und B4 mit B5 multipliziert.

Parameter B6

Die am elektrischen Verteilerschrank des Experiments 1.1 aus den Versuchen bei VTT in Finnland /MAN 94/ und /MAN 96/ gemessene zeitabhängige Brandleistung wird auf den für das ausgewählte Szenario in der Referenzanlage vorhandenen elektrischen Verteilerschrank übertragen. Es ist unsicher, welchen Einfluss die Unterschiede zwischen den beiden Schranktypen und deren Inhalt auf die zeitabhängige Brandleistung haben. Aus diesem Grund wird die gemessene Brandleistung mit einem unsicheren Korrekturfaktor B6 versehen (gleicher Faktorwert zu jedem Zeitpunkt). Für diesen Korrekturfaktor wird jeder Wert zwischen 0.75 und 1.25 in gleichem Maße als möglicherweise zutreffend beurteilt.

Auf die im Experiment festgestellte Zeitspanne, bis zu der sich Flammen außerhalb des Schanks zeigen (960 Sekunden), wird der Korrekturfaktor 1-(B6-1) angewandt.

Parameter B7

Das Rechenmodell CFAST enthält neben den bereits besprochenen epistemischen Größen eine Reihe weiterer unsicherer Parameter und Modellannahmen. Der Einfluss dieser Unsicherheiten auf die Ergebnisse der Anwendung des Rechenmodells ist unbekannt. Er wird deshalb mittels eines unsicheren Korrekturfaktors als epistemische Größe B7 berücksichtigt. Für diesen Korrekturfaktor wird jeder Wert zwischen 0.7 und 1.3 in gleichem Maße als möglicherweise zutreffend beurteilt.

Parameter B45 bis B57

Der Kenntnisstand zur Anzahl der vertikal aus dem Schrank verlaufenden Kabel wird aufgrund der Informationen aus einer Anlagenbegehung durch eine diskrete Gleichverteilung über (8.12) ausgedrückt. Dementsprechend wird jede der ganzen Zahlen von 8 bis einschließlich 12 jeweils mit der subjektiven Wahrscheinlichkeit 0.2 als möglicherweise zutreffend angenommen. Die Parameter B46 bis B57 sind für die zufällig aus Tabelle 4.4 ausgewählten B45 individuellen Brandlastwerte vorgesehen.

Parameter B58 bis B86

Der Kenntnisstand zur Anzahl der Kabel auf der horizontalen Trasse B58 wird durch eine diskrete Histogrammverteilung ausgedrückt, und zwar wird jede ganze Zahl von 16 bis einschließlich 20 mit der gleichen subjektiven Wahrscheinlichkeit von 0.04 und jede ganze Zahl von 21 bis einschließlich 24 mit der gleichen subjektiven Wahrscheinlichkeit von 0.2 für möglicherweise zutreffend gehalten.

Die Anzahl der Kabel mit großen Querschnitten unter jenen auf der horizontalen Trasse ist die epistemische Größe B59. Der Kenntnisstand hierzu wird durch eine diskrete Gleichverteilung ausgedrückt, d.h. jeweils eine subjektive Wahrscheinlichkeit von 0.25 für jede ganze Zahl von 3 bis einschließlich 6.

Für die zufällig aus Tabelle 4.4 ausgewählten individuellen Brandlastwerte sind die Parameter B60 bis B86 vorgesehen.

Parameter B8

Die Korrektur der gemessenen Energiefreisetzung (d.h. Brandleistung) aus dem elektrischen Verteilerschrank mit Parameter B6 lässt den Zeitpunkt, zu dem das Maximum der Brandleistung auftritt, unverändert. Um auch die Unsicherheit über den Zeitpunkt des Maximums im Falle der Übertragung des zeitlichen Verlaufs der Brandleistung aus dem elektrischen Schrank im Experiment auf jenen in der Anlage zu berücksichtigen,

wird dieser Zeitpunkt als epistemische Größe behandelt. Das Maximum kann zwischen 10 min und 47 min eintreten. Eine Zeit zwischen 10 min und 15 min und zwischen 42 min und 47 min ist mit einer subjektiven Wahrscheinlichkeit von jeweils 5 % anzusetzen. Zwischen 15 min und 42 min steigt die Wahrscheinlichkeit kontinuierlich an. Die größte Wahrscheinlichkeit liegt bei etwa 42 min.

Mit dem zufällig ausgewählten Wert für den Parameter B8 wird die Zeitachse des mit dem Parameter B6 (unabhängig von B8) korrigierten Verlaufs der Brandleistung folgendermaßen transformiert:

$$\text{falls } t_{\text{alt}} < t_{\text{max,alt}} : t_{\text{neu}} = t_{\text{anf}} + (B8 - t_{\text{anf}}) (t_{\text{alt}} - t_{\text{anf}}) / (t_{\text{max,alt}} - t_{\text{anf}})$$

$$\text{falls } t_{\text{alt}} \geq t_{\text{max,alt}} : t_{\text{neu}} = t_{\text{end}} + (B8 - t_{\text{end}}) (t_{\text{alt}} - t_{\text{end}}) / (t_{\text{max,alt}} - t_{\text{end}})$$

Parameter B9 bis B11

Der Kenntnisstand zu diesen Versagenswahrscheinlichkeiten wird mit Hilfe der Methode von Bayes quantifiziert. Ausgehend von einer so genannten nichtinformativen a priori-Verteilung der betreffenden Wahrscheinlichkeit gelangt man über das Einbinden der Beobachtungen aus der Betriebserfahrung zur so genannten a posteriori-Verteilung. Sie drückt probabilistisch aus, wie gut man die jeweilige Versagenswahrscheinlichkeit allein aufgrund der vorliegenden Beobachtungen aus der Betriebserfahrung kennt. Alle drei Verteilungen sind Beta-Verteilungen. Die in Tabelle 4.2 angegebenen Lognormal-Verteilungen sind an die 50 %- und 95 %-Fraktile der jeweiligen a posteriori Beta-Verteilung angepasst. Diese Anpassung wird durchgeführt, weil andere PSA-Programme zur Berücksichtigung der epistemischen Unsicherheiten üblicherweise nur mit Verteilungen des lognormalen Typs arbeiten.

Parameter B12 bis B14

B12 bis B14 sind jeweils die ungenau bekannten Wahrscheinlichkeiten für die stochastischen Ereignisse der Branderkennung, wenn noch keine Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind und kein (A13), ein (A14), zwei (A15), bzw. drei automatische Brandmeldedetektoren A16 melden. Der Kenntnisstand zu diesen Größen wird durch eine Gleichverteilung probabilistisch ausgedrückt (über (0, 0.25), (0.25, 0.75), (0.75, 1), bzw. (0.5, 1)). Zwischen B13 und B14 besteht eine Kenntnisstandabhängigkeit. Hohe (bzw. niedrige) Werte für B13 gehen tendenziell einher mit hohen (bzw. niedrigen) Werten für B14. Diese Abhängigkeit wird probabilistisch ausgedrückt mit einem Wert von 0.85 für den Korrelationskoeffizienten. Der Wahrscheinlichkeitswert B13 wird für die zufälligen Ereignisse A14 und A15 verwendet.

Parameter B15

Die Zeitspanne zwischen Brandentstehung und dem Zeitpunkt, zu welchem Rauch zu den automatischen Brandmeldedetektoren (optischen Rauchmeldern) aufgestiegen ist, wird als epistemische Größe behandelt. Eine mögliche stochastische Variabilität wird als vernachlässigbar angesehen gegenüber der Kenntnisstandunsicherheit. Der Kenntnisstand zu B15 wird durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (60 s, 120 s) probabilistisch ausgedrückt.

Parameter B16 und B17

B16 und B17 sind die Endpunkte des Bereichs der stochastischen Variabilität der Ansprechzeit (A5) der automatischen Brandmelder, nachdem Rauch zu ihnen aufgestiegen ist. Der Kenntnisstand zum minimalen Wert der Ansprechzeit wird durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (30 s, 60 s) und zum maximalen Wert durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (90 s, 120 s) probabilistisch ausgedrückt. Die angegebenen Gleichverteilungen modellieren den Kenntnisstand zu den Endpunkten des Bereichs der stochastischen Variabilität der Ansprechzeit der Brandmelder, d.h. jeder Wert zwischen 30 und 60 Sekunden bzw. zwischen 90 und 120 Sekunden wird in gleichem Maße als möglicherweise zutreffender Minimal- bzw. Maximalwert der Ansprechzeit beurteilt.

Parameter B18 bis B20

Die probabilistische Modellierung der stochastischen Variabilität der Temperatur A9, ab der Störsignale auftreten können, enthält drei epistemische Größen. B18 und B19 sind die ungenau bekannten Wahrscheinlichkeitsinhalte der Stufe von 80 °C bis zu einer bestimmten kritischen Temperatur TKS (TKS = Temperaturkriterium „Störsignale“) und der Stufe von TKS bis 220 °C der unbedingten Verteilung (siehe Abbildung 3.1). Die Temperatur TKS an der Grenzlinie zwischen beiden Stufen ist die epistemische Größe B20. Technisch wird sie als die Temperatur interpretiert, bei der Störsignale auftreten können. Der Kenntnisstand zum Wahrscheinlichkeitsinhalt der ersten Stufe B18 wird so quantifiziert, dass die Werte um 0.03 zentriert sind, im Sinne einer Dreiecksverteilung über dem Intervall (0.0, 0.05), d.h. Wertebereiche in der Nähe der beiden Endwerte 0.0 und 0.05 enthalten mit deutlich weniger Grad an Sicherheit den zutreffenden Wahrscheinlichkeitswert als ebenso große Bereiche um den Wert 0.03. Für den Wahrscheinlichkeitsinhalt der zweiten Stufe B19 wird hingegen jeder Wert zwischen 0.8 und 0.9 in gleichem Maße als möglicherweise zutreffend beurteilt. Der Kenntnisstand zu B20 wird durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (180 °C, 200 °C) probabilistisch ausgedrückt.

Parameter B21

B21 ist das ungenau bekannte Maximum der stochastisch variierenden Zeit nach Brandbeginn A10, zu welcher der Rundgänger durch den Raum kommt. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand bewegt sich das Maximum zwischen 9600 und 12000 Sekunden. Jeder Wert ist dabei in gleichem Maße möglich, was durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (9600 s, 12000 s) probabilistisch ausgedrückt wird.

Parameter B22 bis B23

B22 und B23 sind die Endpunkte des Bereichs der stochastischen Variabilität der Reaktionszeit A11 des Wartenpersonals auf die automatische Brandmeldung durch nur einen Brandmelder. Der Kenntnisstand zum minimalen Wert der Reaktionszeit wird durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (30 s, 60 s) und zum maximalen Wert durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (60 s, 120 s) probabilistisch ausgedrückt. Außerdem wird vollständige positive Abhängigkeit zwischen B22 und B23 spezifiziert, d.h. für B23 wird in diesem Fall immer der doppelte Wert von B22 gewählt.

Parameter B24

B24 ist die Verzögerungszeit bis zur Entsendung eines Erkunders nach der Reaktionszeit des Wartenpersonals auf eine Brandmeldung durch Ansprechen von nur einem automatischen Brandmeldedetektor. Hierzu wird der Kenntnisstand durch eine Histogrammverteilung zwischen 30 und 120 Sekunden probabilistisch ausgedrückt. Über den Intervallen (30 s, 60 s) und (90 s, 120 s) beträgt die Wahrscheinlichkeit der Histogrammverteilung jeweils 0.05 und über dem Intervall (60 s, 90 s) hat sie den Wert 0.9.

Parameter B25

Die mögliche stochastische Variabilität der Zeit, die der Erkunder bzw. die Löschkkräfte benötigen, um vor Ort zu gelangen, wird als vernachlässigbar beurteilt im Vergleich zur grundsätzlichen Unsicherheit über diese Zeit. Sie wird deshalb als epistemische Größe behandelt. Der Kenntnisstand zu B25 wird durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (180 s, 300 s) probabilistisch ausgedrückt.

Parameter B26

Die Zeit, die Erkunder oder Rundgänger vor Ort bleiben, um den Brandherd zu finden, wenn nur ein automatischer Brandmelder angesprochen hat, wird als epistemische Größe betrachtet, da die grundsätzliche Kenntnisstandsunsicherheit über diese Zeit die mögliche stochastische Variabilität überwiegt. Eine Gleichverteilung über dem Intervall (180 s, 300 s) quantifiziert den Kenntnisstand zu B26.

Parameter B27

Die Zeit nach dem Auftreten von Störsignalen, zu welcher Rundgänger und Erkunder oder auch Löschkkräfte über zusätzliche Störsignale von der Warte aus informiert werden, wird als aleatorische Größe A17 betrachtet. Sie wird in Bezug gesetzt zu dem Zeitpunkt nach der Meldung durch nur einen Brandmelder, zu welchem der Erkunder informiert wird (aleatorischen Größe A12). Bei zusätzlich auftretenden Störsignalen wird erwartet, dass die Warte entsprechende Informationen schneller weiterleitet, und zwar um den ungenau bekannten Faktor B27. Jeder Wert zwischen 0.5 und 0.75 ist dabei in gleichem Maße für B27 möglich (Gleichverteilung).

Parameter B28

Wenn Erkunder oder Rundgänger den Brandherd nach der Zeit B26 nicht entdeckt haben, verlassen diese wieder den Raum. Die epistemische Größe B28 bezeichnet die Zeit, die der Erkunder benötigt, um ein zweites Mal vor Ort zu gelangen, wenn zusätzlich zur Brandmeldung durch einen Melder Störsignale erst dann auftreten, nachdem dieser den Raum bereits verlassen hat. Der Kenntnisstand zu B28 wird durch eine Gleichverteilung über dem Intervall (120 s, 300 s) probabilistisch ausgedrückt. Gegenüber dieser Kenntnisstandunsicherheit wird eine stochastische Variabilität als vernachlässigbar angesehen.

Parameter B29

Wenn bereits zwei automatische Brandmelder angesprochen haben, werden unverzüglich Löschkkräfte zur Erstbekämpfung eines Entstehungsbrandes vor Ort entsandt. Diese bleiben zunächst so lange vor Ort, wie die Brandmeldungen durch die automatischen Brandmeldedetektoren anstehen. Sie bekämpfen den Brand spätestens ab dem Zeitpunkt, ab welchem Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar werden. Treten zusätzlich zu der Brandmeldung über die Brandmeldeanlage auch noch Störsignale auf, so wird angenommen, dass die Löschkkräfte nach einer Verzögerungszeit von B29 s den Brandherd auf jeden Fall entdecken. Diese Verzögerungszeit wird als epistemische Größe behandelt. Eine Gleichverteilung über dem Intervall (30 s, 60 s) dient als Ausdruck der probabilistischen Kenntnisstandunsicherheit.

Parameter B30 bis B33

Die Zeitspanne, bis zu welcher sich der Löscherfolg einstellt, wird als abhängig von der zu Beginn der Brandbekämpfung herrschenden Temperatur der Heißgasschicht beurteilt. B30 ist eine vom Löschmittel unabhängige Verzögerungszeit (ZA in Abbildung 4.2), welche bis zu einer bestimmten Temperatur (TKB) für zutreffend

gehalten wird. Die Temperatur TKB ist ungenau bekannt, und der Kenntnisstand hierzu wird unter B31 angegeben. Zunächst wird ein Entstehungsbrand mit Handfeuerlöschgeräten (Löschmittel CO₂ bzw. Pulver) bekämpft. Wenn die Zeit für eine Brandbekämpfung mit mobilen Feuerlöschgeräten 900 Sekunden überschreitet, ist davon auszugehen, dass nicht mehr ausreichend Löschmittel vorhanden ist bzw. dass die Wirksamkeit deutlich herabgesetzt ist. Ab diesem Zeitpunkt wird spätestens mit einer Brandbekämpfung mit Wasser über die vorhandenen Wandhydranten und Feuerlöschschläuche begonnen. Für alle Löschmittel (CO₂, Pulver und Wasser) steigt die Verzögerungszeit, ausgehend von B30, ab B31 über der Temperatur linear an. Die Steigung ist jeweils durch B30, B31 und die Verzögerungszeit bei 400 °C (B32+B30 für CO₂ bzw. Pulver und B33+B30 für Wasser) angegeben. Zu diesen vier epistemischen Größen wird der Kenntnisstand jeweils durch eine Gleichverteilung über den Intervallen (90 s, 180 s) für B30, (80 °C, 130 °C) für B31, (3000 s, 4800 s) für B32 und (480 s, 720 s) für B33 probabilistisch modelliert.

Parameter B34 bis B44

Hierbei handelt es sich um von anderen abgeleitete epistemische Größen. Die subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen dazu errechnen sich aus denen bereits erklärter epistemischer Größen. Die entsprechenden Zusammenhänge sind Tabelle 4.3 zu entnehmen.

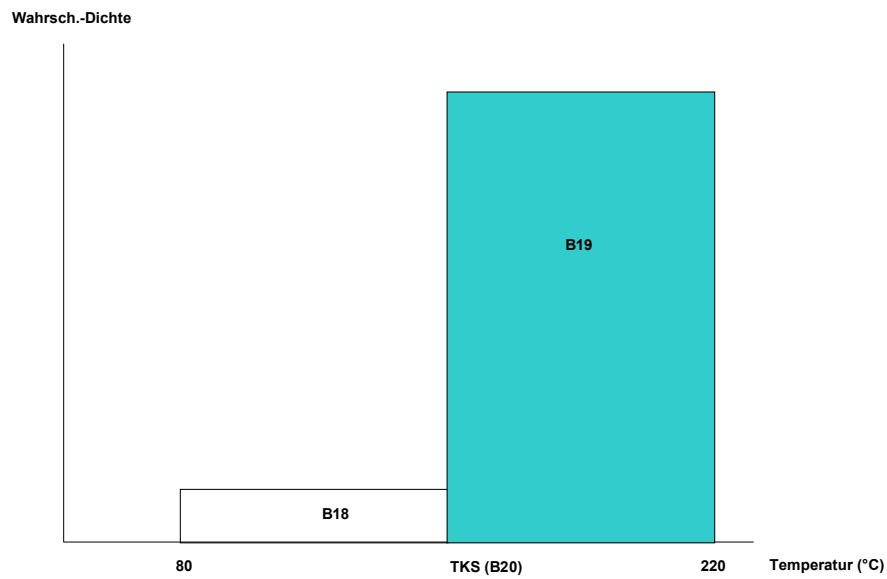


Abb. 4.1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Heißgasschichttemperatur, ab welcher Störsignale auftreten

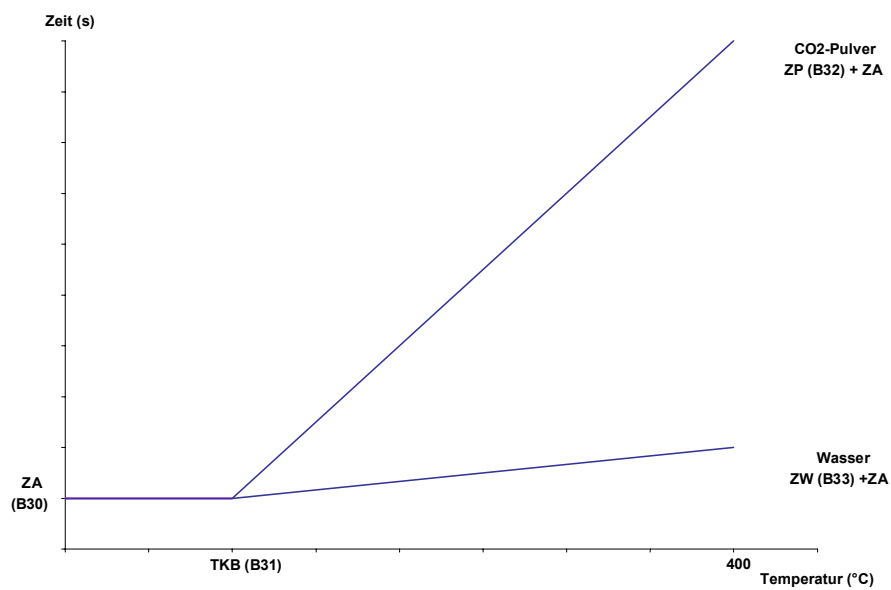


Abb. 4.2 Erforderliche Zeit zur Brandbekämpfung in Abhängigkeit von Temperatur der Heißgasschicht und Löschmittel

Tab. 4.1 Aleatorische Größen und ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Var. Nr.	Kurzname Var.	Vollständiger Name Variabilität	Einheit	Verteilungstyp	Verteil. Par. p1	Verteil. Par. p2	Min.	Max.	n ¹⁾	x ¹⁾ y w, falls gegeben		
1	A5	Reine Ansprechzeit der automatischen Brandmelder, nachdem Rauch zu ihnen aufgestiegen ist	s	Uniform	16, B16	17, B17	16, B16	17, B17				
2	A6	Ansprechzeit der automatischen Brandmelder 1 und 2 ab Brandbeginn im Schrank	s	A5+B15								
3	A7	Ansprechzeit des automatischen Brandmelders 3 ab Brandbeginn im Schrank	s	A5+2*B15								
4	A8	Auftreten von Störsignalen in der Warte		Diskret			0	1	2	0 39, B39 38, B38	1.00	
5	A9	Temperatur, ab der Störsignale anstehen	°C	Histogramm			80	220	2	80.00 40, B40	20, B20 41, B41	220.00
6	A10	Zeit nach Brandbeginn, zu der Rundgänger durch den Raum kommt	s	Uniform	0	21, B21	0	21, B21				
7	A11	Reaktionszeit des Wartepersonals auf Brandmeldung durch nur einen Brandmelder	s	Uniform	22, B22	23, B23	22, B22	23, B23				
8	A12	Zeit nach Brandmeldung durch einen Melder, zu der Erkunder bzw. Rundgänger entsandt bzw. informiert wird	s	A11+B24								
9	A13	Branderkennung durch Rundgänger, wenn noch kein Melder meldet und sich noch keine Flammen außerhalb des Schrankes zeigen		Diskret			0	1	2	0 42, B42	1.00 12, B12	
10	A14	Branderkennung nach Ansprechen von einem Melder, wenn sich noch keine Flammen außerhalb des Schrankes zeigen		Diskret			0	1	2	0 43, B43	1.00 13, B13	
11	A15	Branderkennung nach Ansprechen von zwei Meldern, wenn sich noch keine Flammen außerhalb des Schrankes zeigen		Diskret			0	1	2	0 43, B43	1.00 13, B13	
12	A16	Branderkennung nach Ansprechen von drei Meldern, wenn sich noch keine Flammen außerhalb des Schrankes zeigen		Diskret			0	1	2	0 44, B44	1.00 14, B14	

Tab 4.1 Aleatorische Größen und ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Fortsetzung)

Var. Nr.	Kurzname Var.	Vollständiger Name Variabilität	Einheit	Verteilungstyp	Verteil. Par. P1	Verteil. Par. P2	Min.	Max.	1) n	x 1) y w, falls gegeben			
13	A17	Zeit nach dem Auftreten von Störsignalen, zu der Rundgänger und Erkunder oder Löschkräfte über Störsignale von der Warte aus informiert werden	s	A12*B27									
14	A18	Automatische Brandmeldung durch keinen, einen, 2 oder 3 automatische Brandmelder Diese aleatorische Unsicherheit wird analytisch durch Bildung der Mischung der zugehörigen Ergebnisverteilungen berücksichtigt		Diskret			0	3	4	0 34, B34	1 35, B35	2 36, B36	3 37, B37

Tab. 4.2 Wesentliche epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Par. Nr.	Kurz-name	Vollständiger Parameter-name	Einheit	Verteilungstyp	Verteil. Par. P1	Verteil. Par. P2	Min.	Max.	Median	Faktor	1) n	x 1) y				
1	B1	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes entlang der vertikal verlaufenden Kabel	cm/min	Uniform	2.4	3.6	2.4	3.6								
2	B2	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes entlang der horizontalen Kabeltrasse	cm/min	Uniform	0.8	1.2	0.8	1.2								
3	B3	Summe der Brandlastwerte auf den vertikalen Kabeln	kWh/m	B46+...+B[45+int(B45)]												
4	B4	Summe der Brandlastwerte auf horizontaler Trasse	kWh/m	B60+...+B[59+int(B58-B59)] + B81+...+B[80+int(B59)]												
5	B5	Korrekturfaktor zu Brandlastwerten		Uniform	0.8	1.2	0.8	1.2								
6	B6	Korrekturfaktor zur gemessenen zeitabhängigen Energiefreisetzung im Experiment 1.1		Uniform	0.75	1.25	0.75	1.25								
7	B7	Korrekturfaktor zu der von CFAST errechneten zeitabhängigen Temperatur und Dicke der Heißgasschicht		Uniform	0.7	1.3	0.7	1.3								
8	B8	Zeit für das Maximum der Energiefreisetzung	min	Polygonzug			10	47			5	10.00 0.01	15.00 0.01	42.00 0.057	42.00 0.01	47.00 0.01
9	B9	W(Melder nicht verfügbar)		Lognormal	-9.864	1.297	0	1	5.20 E-05	8.44						
10	B10	W(Meldelinie nicht verfügbar)		Lognormal	-9.688	1.297	0	1	6.20 E-05	8.44						
11	B11	W(Einschub nicht verfügbar)		Lognormal	-5.36	1.287	0	1	4.70 E-03	8.3						
12	B12	W(Branderkennung, wenn kein Brandmelder anspricht und sich noch keine Flammen außerhalb des Schrankes zeigen)		Uniform	0	0.25	0	0.25								

Tab. 4.2 Wesentliche epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Fortsetzung)

Par. Nr.	Kurz-name	Vollständiger Parameter-name	Einheit	Verteilungstyp	Verteil. Par. P1	Verteil. Par. P2	Min.	Max.	Median	Faktor	1) n	x 1) y				
13	B13	W(Branderkennung nach Ansprechen von einem oder zwei Meldern, wenn sich noch keine Flammen außerhalb des Schrankes zeigen)		Uniform Pearson's Rho (B13, B14) = 0.85	0.25	0.75	0.25	0.75								
14	B14	W(Branderkennung nach Ansprechen von drei Meldern, wenn sich noch keine Flammen außerhalb des Schrankes zeigen)		Uniform Pearson's Rho (B13, B14) = 0.85	0.5	1	0.5	1								
15	B15	Zeitspanne zwischen Brandbeginn und Zeitpunkt, zu dem Rauch zu den Brandmeldern aufgestiegen ist	s	Uniform	60	120	60	120								
16	B16	Min(A5)	s	Uniform	30	60	30	60								
17	B17	Max(A5)	s	Uniform	90	120	90	120								
18	B18	W([80°C,TKS])		Dreieck	0.03		0	0.05								
19	B19	W([TKS,220°C])		Uniform	0.8	0.9	0.8	0.9								
20	B20	TKS	°C	Uniform	180	200	180	200								
21	B21	Max(A10)	s	Uniform	9600	12000	9600	12000								
22	B22	Min(A11)	s	Uniform, vollständig positiv abhängig von B22	30	60	30	60								
23	B23	Max(A11)	s	Uniform, vollständig positiv abhängig von B22	60	120	60	120								
24	B24	Verzögerungszeit, bis zur Entsendung des Erkunders (nach Reaktionszeit des Wartepersonals auf Ansprechen nur eines Melders)	s	Histogramm			30	120			3	30.00 0.05	60.00 0.90	90.00 0.05	120.00	
25	B25	Benötigte Zeit des Erkunders oder der Löschkräfte, um vor Ort zu gelangen	s	Uniform	180	300	180	300								

Tab. 4.2 Wesentliche epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Fortsetzung)

Par. Nr.	Kurz-name	Vollständiger Parameter-name	Einheit	Verteilungstyp	Verteil. Par. P1	Verteil. Par. P2	Min.	Max.	Median	Faktor	1) n	x 1) y				
26	B26	Zeit, die Erkunder oder Rundgänger vor Ort bleiben, um Brandherd zu finden, wenn ein Melder angesprochen hat	s	Uniform	180	300	180	300								
27	B27	Faktor für die Zeit (A17), die vergeht bis über zusätzliche Störsignale informiert wird.		Uniform	0.5	0.75	0.5	0.75								
28	B28	Benötigte Zeit des Erkunders, um ein zweites Mal vor Ort zu gelangen, nachdem er bereits einmal den Raum überprüft hat	s	Uniform	120	300	120	300								
29	B29	Verzögerungszeit bis zur Branderkennung, wenn 2 Melder ansprechen und zusätzlich Störsignale auftreten	s	Uniform	30	60	30	60								
30	B30	Basis - Verzögerungszeit für Löscherfolg, ZA	s	Uniform	90	180	90	180								
31	B31	Fußpunkt für Aufstieg der Verzögerungszeit für den Löscherfolg, TKB	°C	Uniform	80	130	80	130								
32	B32	CO ₂ : Inkrement der Verzögerungszeit für Löscherfolg bei 400 °C, ZP	s	Uniform	3000	4800	3000	4800								
33	B33	Wasser: Inkrement der Verzögerungszeit für Löscherfolg bei 400 °C, ZW	s	Uniform	480	720	480	720								

Tab. 4.3 Weitere epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Par. Nr.	Kurz-name	Vollständiger Parametername	Verteilungstyp	Minimum	Maximum	1) n	x 1) y						
34	B34	W(kein Melder spricht an)	$1-(1-B9)*(1-B10) * (1-B11)$										
35	B35	W(genau ein Melder spricht an)	$(1-B34)*B9$										
36	B36	W(genau zwei Melder sprechen an)	$(1-B34)*B9*(1-B9)$										
37	B37	W(alle drei Melder sprechen an)	$(1-B34)*(1-B9)*(1-B9)$										
38	B38	W(Störsignale)	B18+B19										
39	B39	W(keine Störsignale)	1.-B38										
40	B40	W-Inhalt des ersten Teils der bedingten Temperaturverteilung, ab der Störsignale anstehen	B18/B38										
41	B41	W-Inhalt des zweiten Teils der bedingten Temperaturverteilung, ab der Störsignale anstehen	B19/B38										
42	B42	1.-B12	1.-B12										
43	B43	1.-B13	1.-B13										
44	B44	1.-B14	1.-B14										
45	B45	Anzahl vertikal verlaufender Kabel		8	12	5	8.00 0.20	9.00 0.20	10.00 0.20	11.00 0.20	12.00 0.20		
46	B46	Kabel 1, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
47	B47	Kabel 2, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
48	B48	Kabel 3, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
49	B49	Kabel 4, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04

Tab. 4.3 Weitere epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Fortsetzung)

Par. Nr.	Kurz-name	Vollständiger Parametername	Verteilungstyp	Minimum	Maximum	1) n	x 1) y						
50	B50	Kabel 5, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
51	B51	Kabel 6, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
52	B52	Kabel 7, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
53	B53	Kabel 8, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
54	B54	Kabel 9, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
55	B55	Kabel 10, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
56	B56	Kabel 11, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
57	B57	Kabel 12, vertikal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
58	B58	Anzahl der Kabel auf horizontaler Trasse	Diskret	16	24	9	16.00 0.04	17.00 0.04	18.00 0.04	19.00 0.04	20.00 0.04	...	24.00 0.04
59	B59	Anzahl „dicker“ Kabel auf horizontaler Trasse	Diskret	3	6	4	3.00 0.25	4.00 0.25	5.00 0.25	6.00 0.25			
60	B60	Dünnes Kabel 1, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
61	B61	Dünnes Kabel 2, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
62	B62	Dünnes Kabel 3, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
63	B63	Dünnes Kabel 4, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04

Tab. 4.3 Weitere epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Fortsetzung)

Par. Nr.	Kurz-name	Vollständiger Parametername	Verteilungstyp	Minimum	Maximum	1) n	x 1) y						
64	B64	Dünnes Kabel 5, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
65	B65	Dünnes Kabel 6, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
66	B66	Dünnes Kabel 7, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
67	B67	Dünnes Kabel 8, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
68	B68	Dünnes Kabel 9, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
69	B69	Dünnes Kabel 10, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
70	B70	Dünnes Kabel 11, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
71	B71	Dünnes Kabel 12, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
72	B72	Dünnes Kabel 13, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
73	B73	Dünnes Kabel 14, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
74	B74	Dünnes Kabel 15, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
75	B75	Dünnes Kabel 16, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
76	B76	Dünnes Kabel 17, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
77	B77	Dünnes Kabel 18, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04

Tab. 4.3 Weitere epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Fortsetzung)

Par. Nr.	Kurz-name	Vollständiger Parametername	Verteilungstyp	Minimum	Maximum	1) n	x 1) y						
78	B78	Dünnes Kabel 19, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
79	B79	Dünnes Kabel 20, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
80	B80	Dünnes Kabel 21, horizontal	Diskret	0.45	2.28	18	0.45 0.04	0.50 0.08	0.57 0.08	0.66 0.08	0.74 0.04	...	2.28 0.04
81	B81	Dickes Kabel 1, horizontal	Diskret	2.74	27.4	3	2.74 0.33333	3.23 0.33333	27.40 0.33334				
82	B82	Dickes Kabel 2, horizontal	Diskret	2.74	27.4	3	2.74 0.33333	3.23 0.33333	27.40 0.33334				
83	B83	Dickes Kabel 3, horizontal	Diskret	2.74	27.4	3	2.74 0.33333	3.23 0.33333	27.40 0.33334				
84	B84	Dickes Kabel 4, horizontal	Diskret	2.74	27.4	3	2.74 0.33333	3.23 0.33333	27.40 0.33334				
85	B85	Dickes Kabel 5, horizontal	Diskret	2.74	27.4	3	2.74 0.33333	3.23 0.33333	27.40 0.33334				
86	B86	Dickes Kabel 6, horizontal	Diskret	2.74	27.4	3	2.74 0.33333	3.23 0.33333	27.40 0.33334				

Tab. 4.4 Datenblatt zu den in der Referenzanlage verwendeten Kabelarten

Auswahl- und Bestelldaten	Aderzahl und Nenn- querschnitt mm ²	Bestell-Nr.	Leiter Mindest- anzahl der Drähte	Durch- messer (Größtmaß) mm	Leitungsaußen- durchmesser		Gewicht netto 1000 m ca. kg	Strombelast- barkeit Verlegeart ¹⁾ B2 C		Brandlast werte kWh/m
					Kleinst- wert mm	Größt- wert mm		A	A	
(N)HXMH-O FE 180	2x1,5	5DC9208	1	1,4	8,5	9,5	121	15,5	19,5	0,45
	3x1,5	5DC9308	1	1,4	9,3	10,3	149	14	17,5	0,50
	4x6	5DC9438	1	2,8	13,8	15,4	422	33	41	1,12
	4x10	5DC9448	1	3,6	16,0	18,0	630	46	57	1,47
	4x16	5DC9458	7	5,2	20,3	22,3	990	61	76	1,94
	4x25	5DC9468	7	6,5	24,6	27,6	1510	77	96	2,74
	7x1,5	5DC9988	1	1,4	10,9	12,5	231	14 ²⁾	17,5 ²⁾	0,78
(N)HXMH-J FE 180	3x1,5	5DC9301	1	1,4	9,3	10,3	149	15,5	19,5	0,50
	3x2,5	5DC9311	1	1,8	9,4	11,0	178	21	26	0,57
	3x4	5DC9321	1	2,3	10,9	12,5	247	28	35	0,74
	3x6	5DC9331	1	2,8	12,3	13,9	332	37	46	0,92
	3x10	5DC9341	1	3,6	14,7	16,7	510	50	63	1,26
	4x1,5	5DC9401	1	1,4	9,5	11,1	167	14	17,5	0,57
	4x2,5	5DC9411	1	1,8	10,2	11,8	211	19	24	0,66
	4x4	5DC9421	1	2,3	12,2	13,8	312	26	32	0,93
	4x6	5DC9431	1	2,8	13,8	15,4	422	33	41	1,12
	4x10	5DC9441	1	3,6	16,0	18,0	630	46	57	1,47
	4x16	5DC9451	1	5,2	20,3	22,3	990	61	76	1,94
	4x25	5DC9461	7	6,5	24,6	27,6	1510	77	96	2,74
	4x35	5DC9471	7	7,8	27,3	30,3	1960	95	119	3,23
	5x1,5	5DC9501	1	1,4	10,0	11,6	191	14	17,5	0,66
	3x2,5	5DC9511	1	1,8	11,1	12,7	254	19	24	0,77
	5x4	5DC9521	1	2,3	13,7	15,3	388	26	32	1,14
	5x6	5DC9531	1	2,8	14,8	16,8	510	33	41	1,31
	5x10	5DC9541	1	3,6	17,5	19,5	760	46	57	1,73
	5x16	5DC9551	7	5,2	22,7	24,7	1220	61	76	2,28
	7x1,5	5DC9990	1	1,4	10,9	12,5	231	14 ²⁾	17,5 ²⁾	0,78
	7x2,5	5DC9987	1	1,8	12,4	14,0	323	19 ²⁾	24 ²⁾	0,97

¹⁾ Verlegeart: Auf oder in Wänden oder unter Putz
B2: In Elektroinstallationsrohren oder -kanälen
C: Direkt verlegt

²⁾ Bei mehr als 3 belasteten Adern sind die Umrechnungsfaktoren gemäß DIN VDE 0298 Teil 4 Tabelle 13 zu berücksichtigen.

Den Belastbarkeitsangaben liegt eine Umgebungstemperatur von 30°C zugrunde. Bei anderen Umgebungstemperaturen sind für die Ermittlung der Strombelastbarkeit die nachstehenden Umrechnungsfaktoren anzuwenden:

Umgebungs- temperatur °C	35	40	45	50	55
Umrechnungs- faktor	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61

4.4 Fortpflanzung der stochastischen Variabilität und der Kenntnisstandunsicherheit durch das Rechenmodell

Das Rechenmodell für die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen besteht zum einen aus dem Dynamikmodell für Brandsimulationsrechnungen mit dem Brandsimulationscode CFAST und zum anderen aus dem Modell der Gegenmaßnahmen, welches die folgenden Parameter berücksichtigt:

- Wie viele der Brandmelder funktionieren im Brandfall noch ordnungsgemäß?

- Wann sprechen die Brandmelder an?
- Treten Störsignale auf und falls ja, wann?
- Wann werden ein Erkunder (als Folge der Brandmeldung durch nur einen automatischen Melder) oder Löschkräfte (als Folge der Brandalarmierung durch zwei oder drei automatische Brandmelder) entsandt?
- Wann treffen Rundgänger, Erkunder bzw. Löschkräfte vor Ort ein?
- Wird der Brand erkannt?
- Wann stellt sich der der Löscherfolg ein, wenn der Brand erkannt wird?

Dabei sind der Zeitpunkt, zu welchem Störsignale auftreten, und der Zeitpunkt des Löscherfolgs abhängig von der jeweils vorherrschenden Temperatur der Heißgas-schicht in dem Kontrollvolumen des Brandbereiches, welches den elektrischen Vertei-lerschrank als Brandentstehungsort enthält.

4.4.1 Berücksichtigung der epistemischen und aleatorischen Größen in zwei Monte-Carlo-Simulationsschleifen

In einer „äußeren“ Monte-Carlo-Simulation wurden 100 Wertekombinationen zu den epistemischen Größen B1 bis B33 gemäß den subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Kenntnisstandabhängigkeiten in Tabelle 4.2 zufällig ausgewählt. Die übrigen epistemischen Größen (B34 bis B86 aus Tabelle 4.3) gehen entweder in eine der vorgenannten Größen ein oder sind von diesen abgeleitet. Mit jeder der 100 Wertekombinationen zu B1 bis B8 wurde jeweils ein Rechenlauf mit CFAST durchgeführt. Zu jedem CFAST- Rechenlauf und jeder der vier möglichen Ausprägungen von A18 (kein, genau ein, genau zwei, alle drei Melder melden) wird nun der Einfluss der übrigen aleatorischen Größen des Gegenmaßnahmenmodells in einer „inneren“ Monte-Carlo-Simulation untersucht. Dazu werden 100 Wertekombinationen zu den aleatorischen Größen A5 bis A17 gemäß den zugehörigen Verteilungen in Tabelle 4.1 zufällig ausgewählt. A18 wird wegen der sehr niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeiten einiger seiner Ausprägungen nicht über die innere Monte-Carlo-Simulation, sondern analytisch, d.h. durch Bildung der Mischung der zugehörigen Ergebnisverteilungen berücksichtigt. Die Mischungsgewichte sind die jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ausprägungen von A18.

Als Ergebnisse eines Rechenlaufs mit CFAST werden die Zeitverläufe der Temperatur in der Heißgasschicht und deren entsprechende Schichtdicke für die einzelnen Räume bzw. Kontrollvolumina der gewählten Diskretisierung angegeben. Sie besteht aus insgesamt 9 Kontrollvolumina (siehe Abbildung 4.3). Für jeden der 100 CFAST-Rechenläufe und jede der Ausprägungen von A18 wird mit jeder der dazu ausgewählten 100 Wertekombinationen aus A5 bis A17 das Gegenmaßnahmenmodell durchlaufen.

Nach Durchführung der beiden Simulationsschleifen kann der Einfluss der Kenntnisstandunsicherheiten auf die Quantifikation der Branddynamik und auf die in der inneren Simulationsschleife berücksichtigte Stochastik der Gegenmaßnahmen näherungsweise bestimmt werden, d.h. zu jedem Zeitpunkt erhält man für jedes Kontrollvolumen der Raumbereichsdiskretisierung eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Temperatur der Heißgasschicht und der Schichtdicke sowie eine Unsicherheitsaussage zu dieser Verteilung. Letztere gibt an, wie gut die Wahrscheinlichkeitsverteilung aufgrund der berücksichtigten epistemischen Größen bestimmt werden kann.

Ebenso erhält man für die maximale Temperatur bzw. Schichtdicke und für die Zeitpunkte, zu denen diese Maxima angenommen werden, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung mit Unsicherheitsaussage. Aus dieser Information ist beispielsweise zu entnehmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die maximale Temperatur einen bestimmten Grenzwert überschreitet und wie gut man diese Überschreitenswahrscheinlichkeit nur kennen kann. Die Unsicherheitsaussage zur Überschreitenswahrscheinlichkeit ist der zugehörigen subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung zu entnehmen. Aus der subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung lässt sich auch der Erwartungswert der Überschreitenswahrscheinlichkeit ermitteln, der als Eingangsgröße in das PSA-Modell eingeht. Damit wird ein (einzelner) Punktwert für das PSA-Ergebnis berechnet. Die Berücksichtigung der subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung der Überschreitenswahrscheinlichkeit im PSA-Modell führt zur subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung des PSA-Ergebnisses, die für die Unsicherheitsanalyse erforderlich ist.

Es kann auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zeit, über der Temperaturen von mehr als x °C (z. B. $x = 200$ °C) anstehen, ermittelt werden. Daraus lässt sich die Wahrscheinlichkeit ablesen, mit der diese Zeit einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Auch für diese Überschreitenswahrscheinlichkeit lässt sich eine subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung angeben, aus welcher z. B. 90 %- oder 95 %-Intervalle als Unsicherheitsaussage entnommen werden können.

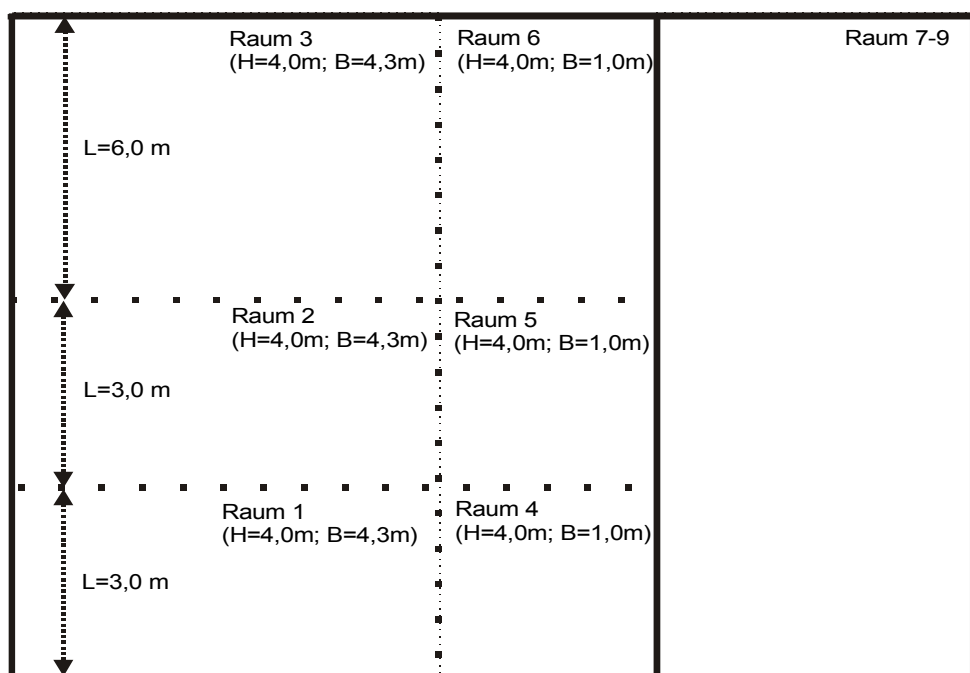
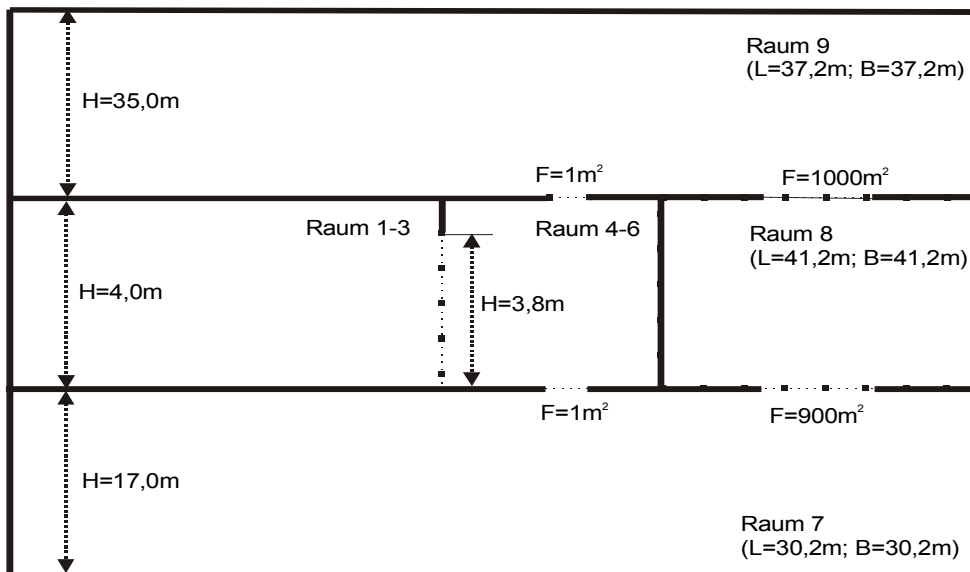


Abb. 4.3 Räumliche Diskretisierung für die CFAST-Modellierung

4.5 Logik des Modells der Gegenmaßnahmen

Bezüglich der Brandmeldung über das automatische Brandmeldesystem können vier Fälle (kein, ein, zwei bzw. drei automatische Brandmeldedetektoren melden) eintreten. Welcher davon bei dem angenommenen Szenario eines Kabelbrandes innerhalb einer Redundanz im Sicherheitsbehälter der Referenzanlage eintritt, ist eine aleatorische Unsicherheit. Die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten sind B34 bis B37.

4.5.1 Kein Ansprechen von Brandmeldern

Treten Störsignale A8 auf, so stehen diese ab Heißgasschichttemperatur A9 an, können aber keinem Raumbereich zugeordnet werden.

- a) A10 Sekunden nach Brandbeginn trifft der Rundgänger ein. Erscheinen zu diesem Zeitpunkt bereits Flammen außerhalb des Verteilerschranks (dies ist $960 \cdot (2 - B6)$ Sekunden nach Brandbeginn der Fall), so erkennt der Rundgänger auf jeden Fall den Brand. Sind noch keine Flammen zu sehen, so besteht mit einer geringen Wahrscheinlichkeit (B12) die Möglichkeit (A13), dass er dennoch den Brand entdeckt. Im Fall der Branderkennung beginnt er unverzüglich mit der Brandbekämpfung.
- b) Er wählt zur Brandbekämpfung zunächst ein transportables Handfeuerlöschgerät (Löschmittel: CO₂ bzw. Pulver), eine Brandbekämpfung mit Wasser über Feuerlöschschläuche und Wandhydranten wird im Allgemeinen nur dann begonnen, falls sich mit den mobilen Löschgeräten bis dahin (d.h. bis zu 900 Sekunden) kein Löscherfolg einstellt. Abhängig von der zum Zeitpunkt t des Beginns der Brandbekämpfung vorherrschenden Temperatur $T(t)$ in der Heißgasschicht des Kontrollvolumens im Brandbereich, welches den Verteilerschrank als Zündquelle enthält, stellt sich der Löscherfolg nach B30 Sekunden ein, falls $T(t) < B31$, bzw. nach $t_e = B30 + (T(t) - B31) \cdot (B32 - B30) / (400 - B31)$ Sekunden oder, falls $t_e > 900$ und mit Wasser gelöscht wird, nach $900 + B30 + (T(t + 900) - B31) \cdot (B33 - B30) / (400 - B31)$ Sekunden. Der teilweise Löscherfolg, welcher sich gegebenenfalls nach 900 Sekunden Brandbekämpfung mit mobilen Handfeuerlöschgeräten (mit CO₂ bzw. Pulver als Löschmittel) einstellt, bleibt bei der Berechnung der anschließenden Brandbekämpfung mit Wasser unberücksichtigt.

4.5.2 Ansprechen von genau einem Brandmelder

Erfolgt eine Brandmeldung über nur einen automatischen Brandmeldedetektor, so ist dies aufgrund der technischen Gegebenheiten der Melder 1. Er meldet A6 Sekunden nach Brandbeginn.

In diesem Fall entsendet die Warte zunächst einen Erkunder, der feststellen soll, ob es sich um einen Brand oder nur einen Fehllarm des entsprechenden Melders handelt. Dies geschieht A12 Sekunden nach Brandmeldung durch den Melder 1. Der Erkunder trifft nach B25 Sekunden vor Ort ein. Treten zu diesem Zeitpunkt bereits Flammen außerhalb des elektrischen Verteilerschranks auf (dies ist $960 * (2 - B6)$ Sekunden nach Brandbeginn der Fall), so erkennt der Erkunder auf jeden Fall den Brand. Sind noch keine Flammen zu sehen, so besteht mit der Wahrscheinlichkeit B13 die Möglichkeit A14, dass er den Brand entdeckt. Im Fall der Branderkennung beginnt er unverzüglich mit der Brandbekämpfung (weiter unter 4.5.1 b).

Ist der Rundgänger vor Ort und entdeckt den Brand vor dem Erkunder (B13, A14), so beginnt er mit der Brandbekämpfung. Sowohl Erkunder als auch Rundgänger verlassen den Ort wieder, wenn sie B26 Sekunden nach ihrer Ankunft den Brandherd nicht entdeckt haben und kein weiterer Brandmelder angesprochen hat. Hat der Erkunder nach erfolgloser Suche bereits den Raum verlassen, so erkennt der Rundgänger den Brand an den Flammen außerhalb des Schrankes, sofern er frühestens $960 * (2 - B6)$ Sekunden nach Brandbeginn eintrifft. Der Rundgänger beginnt dann unverzüglich mit der Brandbekämpfung.

Treten zusätzlich zur Brandmeldung über den automatischen Brandmeldedetektor auch noch Störsignale A8 auf, so stehen diese ab Heißgasschichttemperatur A9 an. A17 Sekunden nach dem Auftreten von Störsignalen gibt die Warte die Information weiter. Ist der Erkunder über die Störsignale bereits informiert, so bleibt er vor Ort, bis er den Brandherd entdeckt hat. Er beginnt spätestens mit der Brandbekämpfung, wenn sich Flammen außerhalb des Schrankes zeigen. Wird der Erkunder über Störsignale erst dann informiert, wenn er den Raum nach erfolgloser Suche schon wieder verlassen hat (B26 Sekunden nach seiner Ankunft), so benötigt er zusätzliche B28 Sekunden, um wieder vor Ort zu gelangen. Der Löschvorgang beginnt, sobald er am Ort ist und Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind.

4.5.3 Ansprechen von genau zwei Brandmeldern

Wenn zwei automatische Brandmeldedetektoren einen Brand signalisieren, sind dies aufgrund der technischen Gegebenheiten die Melder 1 und 2. Diese melden infolge etwa gleichen räumlichen Abstands zum elektrischen Verteilerschrank als Brandentstehungsort gleichzeitig nach A6 Sekunden. Es werden unmittelbar Löschkräfte entsandt und die Werksfeuerwehr alarmiert, erste Löschkräfte treffen nach B25 Sekunden vor Ort ein. Erscheinen zu diesem Zeitpunkt bereits Flammen außerhalb des elektrischen Verteilerschranks (dies ist $960 \cdot (2 - B6)$ Sekunden nach Brandbeginn der Fall), so erkennen die Einsatzkräfte auf jeden Fall den Brand. Sind noch keine Flammen zu sehen, so besteht mit der Wahrscheinlichkeit B13 die Möglichkeit (A15), dass sie den Brandherd entdecken. Im Fall der Branderkennung wird unverzüglich mit der Brandbekämpfung begonnen (weiter unter 4.5.1 b)).

Ist der Rundgänger zufällig vor den Löschkräften vor Ort und entdeckt den Brand (B13, A15), so beginnt er mit der Brandbekämpfung. Der Rundgänger verlässt den Ort wieder, wenn er B26 Sekunden nach seiner Ankunft den Brandherd nicht entdeckt hat. Bei Brandalarm durch mindestens zwei automatische Brandmelder bleiben die Löschkräfte, d.h. Brandersthelfer bzw. Feuerwehr, so lange vor Ort, bis sie den Brandherd entdeckt haben. Die Brandbekämpfung beginnt spätestens dann, wenn sich Flammen außerhalb des Schrankes zeigen.

Treten zusätzlich zur Brandmeldung über die beiden automatischen Brandmelder auch noch Störsignale (A8) auf, so stehen diese ab Heißgasschichttemperatur (A9) an. A17 Sekunden nach dem Auftreten von Störsignalen gibt die Warte die Information weiter. Sobald die Löschkräfte vor Ort über die Störsignale informiert sind, vergeht eine weitere Zeit von B29 Sekunden, bis sie den Brandherd schließlich auf jeden Fall entdecken.

4.5.4 Ansprechen aller drei Brandmelder

Bei Brandalarm durch alle drei im Brandbereich installierten automatischen Brandmeldedetektoren werden unmittelbar Löschkräfte, d.h. Brandersthelfer, zur Brandbekämpfung vor Ort entsandt und gleichzeitig die Werksfeuerwehr alarmiert. Alle drei Melder melden nach A7 Sekunden. Die unmittelbar entsandten Löschkräfte treffen nach B25 Sekunden vor Ort ein. Alle im Brandbereich eintreffenden Löschkräfte, d.h.

Brandersthelfer und Werksfeuerwehr, bleiben in diesem Fall so lange vor Ort, bis der Brandherd entdeckt ist. Erscheinen zu diesem Zeitpunkt bereits Flammen außerhalb des elektrischen Verteilerschranks (dies ist $960 \cdot (2 - B6)$ Sekunden nach Brandbeginn der Fall), wird der Brand auf jeden Fall erkannt. Sind noch keine Flammen zu sehen, so besteht mit der Wahrscheinlichkeit B14 die Möglichkeit (A16), dass der Brandherd entdeckt wird. Im Fall der Branderkennung wird unverzüglich mit der Brandbekämpfung begonnen.

Ist der Rundgänger zufällig vor den Löschkräften vor Ort und entdeckt den Brand (B14, A16), so beginnt er mit der Brandbekämpfung. Der Rundgänger verlässt den Ort, wenn er B26 Sekunden nach seiner Ankunft den Brandherd nicht entdeckt hat.

Treten zusätzlich zur Brandmeldung über die automatischen Brandmelder auch noch Störsignale (A8) auf, so stehen diese ab Heißgasschichttemperatur (A9) an. A17 Sekunden nach dem Auftreten von Störsignalen gibt die Warte die Information weiter. Sobald die Einsatzkräfte vor Ort über die Störsignale informiert sind, vergeht eine weitere Zeit von B29 Sekunden, bis der Brandherd schließlich auf jeden Fall entdeckt wird.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung, beispielsweise für die Maximaltemperatur in Raum 1, ist die Mischung der entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu den vier Fällen (Ausprägungen von A18) mit deren Wahrscheinlichkeiten (B34 bis B37) als Mischungsgewichten. Die Wahrscheinlichkeit, mit der beispielsweise im Raum 1 eine Heißgasschichttemperatur über x °C länger als y Sekunden ansteht, ist die Summe der Produkte der entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeit zum Fall und der jeweiligen Fallwahrscheinlichkeit.

4.6 Ergebnisse der probabilistischen Dynamikrechnung einschließlich Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

Wie bereits erläutert, beschränken sich die berücksichtigten Stochastikeinflüsse (aleatorische Unsicherheiten) auf das Gegenmaßnahmenmodell. Sie wirken nicht auf die Ergebnisse der CFAST-Rechnung, weil der Einfluss der Brandbekämpfung auf die Temperaturentwicklung in CFAST nicht modelliert wird. Demnach wirken auf die Dynamikrechnung mit CFAST nur die epistemischen Unsicherheiten. In /HAI 02/ wird die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse der CFAST-Rechnungen im Detail beschrieben.

Der Einfluss der aleatorischen Unsicherheiten (siehe Tabelle 4.1) im Gegenmaßnahmenmodell bestimmt in Kombination mit der in CFAST modellierten Dynamik die Ergebnisse für das ausgewählte Brandszenario. Auf die ermittelten Ergebnisse wirken alle berücksichtigten epistemischen Unsicherheiten (siehe Tabellen 4.2 und 4.3).

Bei den Ergebnissen der Analyse für das gewählte Brandszenario handelt es sich beispielsweise um die (bedingte - nämlich unter der Bedingung des Brandereignisses) Wahrscheinlichkeitsverteilung

- der Heißgasschichttemperatur zum Zeitpunkt t im jeweiligen Kontrollvolumen,
- der Heißgasschichtdicke zum Zeitpunkt t im jeweiligen Kontrollvolumen,
- der maximalen Heißgasschichttemperatur im jeweiligen Kontrollvolumen,
- der maximalen Heißgasschichtdicke im jeweiligen Kontrollvolumen,
- der Zeitdauer, über die eine Heißgasschichttemperatur von mehr als x °C im jeweiligen Kontrollvolumen ansteht,

sowie um die (bedingte) Wahrscheinlichkeit, mit der im jeweiligen Raum eine bestimmte Heißgasschichttemperatur von x °C bzw. eine Schichtdicke dieser Gasschicht von einer Anzahl von y Metern überschritten wird bzw. länger als t Sekunden überschritten wird.

Nachfolgend entfällt der Hinweis auf die Bedingung (Eintritt des Brandereignisses), weiterhin erfolgt eine Beschränkung auf das Kontrollvolumen („Raum“) 1 sowie auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung

- der maximalen Heißgasschichttemperatur,
- der Zeitdauer, über die eine Heißgasschichttemperatur von mehr als 200 °C ansteht,

sowie auf die Wahrscheinlichkeit,

- mit der eine Heißgasschichttemperatur von 200 °C überschritten wird,
- mit der eine Heißgasschichttemperatur von mehr als 200 °C länger als 600 Sekunden ansteht.

Jede der Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist die Mischung aus vier bedingten Verteilungen, nämlich zu den Ausprägungen „Kein Brandmelder meldet“, „Genau ein Brandmelder meldet“, „Genau zwei Brandmelder melden“ und „Alle drei Brandmelder melden“ des Brandmeldesystems (A18). Die Mischungsgewichte sind die Wahrscheinlichkeiten der vier Ausprägungen. Sie können aufgrund der epistemischen Unsicherheiten B9, B10 und B11 (siehe Tabelle 4.2) nur ungenau angegeben werden. Abbildung 4.4 bis Abbildung 4.7 zeigen die empirischen Verteilungen der aus den 100 zufällig ausgewählten Werten zu B9, B10 und B11 ermittelten Wahrscheinlichkeiten. Aus Abbildung 4.4 ist beispielhaft ersichtlich, dass die Nichtverfügbarkeit des Brandmeldesystems mit subjektiver Wahrscheinlichkeit 0.95 unter etwa 0.03 liegt, und ein oberes (95 %, 95 %) statistisches Toleranzlimit der Nichtverfügbarkeit liegt über 0.05. Die Wahrscheinlichkeit, dass genau ein Melder melden kann, liegt mit subjektiver Wahrscheinlichkeit 0.95 unter etwa $4.9 \cdot 10^{-4}$ und jene für genau zwei Melder ebenfalls unter etwa $4.9 \cdot 10^{-4}$. Entsprechend liegt, wie aus Abbildung 4.7 hervorgeht, die Wahrscheinlichkeit für die vollständige Funktionsfähigkeit des Brandmeldesystems (alle drei Brandmelder können melden) mit subjektiver Wahrscheinlichkeit von 0.95 über 0.99.

In /HAI 02/ sind folgende Aussagen detailliert beschrieben:

- Unsicherheits- und Sensitivitätsaussagen zur Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1,
- Unsicherheits- und Sensitivitätsaussagen zur Wahrscheinlichkeit für Überschreitungen der Heißgasschichttemperatur von 200 °C im Kontrollvolumen 1,
- Unsicherheits- und Sensitivitätsaussagen zur Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zeitdauer des Anstehens von Heißgasschichttemperaturen über 200 °C im Kontrollvolumen 1,
- Unsicherheits- und Sensitivitätsaussagen zur Wahrscheinlichkeit für Heißgasschichttemperaturen im Kontrollvolumen 1 von über 200 °C über mehr als 600 Sekunden.

Nachfolgend werden nur die Analysen bez. der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 interpretiert.

Abbildung 4.8 zeigt die Stichprobe von 100 Wahrscheinlichkeitsverteilungen der maximalen Temperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1, welche den Ergebnissen

von 100 Rechenläufen mit CFAST entspricht, d.h., zu jedem CFAST-Rechenlauf ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung aufgrund der Stochastikeinflüsse (aleatorischen Unsicherheiten A5 bis A18 in Tabelle 4.1) aus dem Gegenmaßnahmenmodell. Aus der Abbildung geht unter anderem hervor, dass die maximale Heißgasschichttemperatur, welche mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.9 nicht überschritten wird, aufgrund der epistemischen Größen in Tabelle 4.2 nur sehr ungenau anzugeben ist. Sie liegt für 90 % der Verteilungen aus der Stichprobe, d.h. mit einer subjektiven Wahrscheinlichkeit von 0.9, etwa zwischen 80 °C und 265 °C. Der Einfluss des Stichprobenumfangs auf die Schätzung des Temperaturintervalls ist hier noch nicht berücksichtigt.

Aufschlussreich ist die Betrachtung der vier bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der maximalen Heißgasschichttemperatur, d.h. unter der Bedingung eines jeden der vier Ereignisse „Kein Brandmelder meldet“, „Genau ein Brandmelder meldet“, „Genau zwei Brandmelder melden“ und „Alle drei Brandmelder melden“. Die bedingten Verteilungen dafür sind in den Abbildungen 4.9 bis 4.12 zu sehen. Der Kenntnisstand zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten der vier Ereignisse ist den Abbildungen 4.4 bis 4.7 zu entnehmen.

Abbildung 4.9 zeigt die Verteilungen der maximalen Heißgasschichttemperatur für die Situation, dass kein automatischer Brandmelder anspricht. Hier zeigt sich deutlich der Stochastikeinfluss der Zeit, zu welcher der Rundgänger eintrifft (A10) und des zufälligen Ereignisses A13, dass dieser den Brand erkennt, wenn noch keine Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind. Dies sind in diesem Fall die einzigen Stochastikeinflüsse. Sie führen zu den Wahrscheinlichkeiten für kleinere Maximaltemperaturen als im jeweiligen CFAST-Rechenlauf errechnet (siehe die Treppenstufen vor dem jeweiligen Verteilungssprung bei der Maximaltemperatur aus dem CFAST-Rechenlauf). Dabei handelt es sich um Fälle, in denen der Rundgänger so frühzeitig eintrifft und den Brand erkennt, dass er noch vor Erreichen der Maximaltemperatur des CFAST-Rechenlaufs einen Löscherfolg erzielt.

A10 und A13 legen aber auch die Wahrscheinlichkeit fest, mit der die Maximaltemperatur jene des CFAST-Rechenlaufs ist. Das ist dann der Fall, wenn der Rundgänger so spät eintrifft, dass er erst nach dem Zeitpunkt des Temperaturmaximums im CFAST-Rechenlauf einen Löscherfolg erzielt, oder dann, wenn er den Brand nicht erkennt und die Branddynamik des CFAST-Rechenlaufs unbeeinflusst von Löschmaßnahmen bleibt.

Der Stochastikeinfluss bzgl. der Meldezeiten (A6 und A7) und der Störsignale (A8, A9 und A17) wirkt sich gemäß der Beschreibung des Gegenmaßnahmenmodells in Kapitel 4.5 in den Fällen der Brandmeldung durch mindestens einen automatischen Brandmeldedetektor aus.

Bei Ansprechen nur eines Melders macht sich zusätzlich der Stochastikeinfluss von A12 bemerkbar. A12 ist die Zeit, die nach Meldung durch die Brandmeldeanlage vergeht, bis ein Erkunder entsendet wird. Zusammen mit dem zufälligen Ereignis A14, dass der Brand erkannt wird, wenn noch keine Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind, wirkt sich A12 auf die Zeit des Löscherfolgs aus. Wie in Abbildung 6.10 zu erkennen ist, führt insbesondere A14 zu einer Ausdehnung und Verschiebung der Verteilungen hin zu niedrigeren Maximaltemperaturen. Auf A6 und A12 ist die leichte Neigung des Verteilungsanstiegs zurückzuführen.

Die deutlichen breiten Stufen in den Verteilungen mit einem anschließenden senkrechten Verteilungssprung weisen vor allem auf Fälle hin, bei denen entweder der Brand nicht erkannt wird und die Branddynamik des CFAST-Rechenlaufs ungestört bleibt, oder der Beginn der Brandbekämpfung auf den Zeitpunkt fällt, bei dem sich bereits Flammen außerhalb des Schrankes zeigen, und das Löschen noch vor dem Erreichen des Temperaturmaximums des CFAST-Rechenlaufs beendet ist, oder der Brand erst nach Erreichen dieses Maximums gelöscht wird. Eine spätere Brandbekämpfung erfolgt beispielsweise, wenn der Erkunder den Brand nicht sofort erkennt, er aber wegen zusätzlich auftretender Störsignale vor Ort bleibt oder zum Ort zurückkehren muss. Die Brandbekämpfung erfolgt dann, sobald er vor Ort ist und sich Flammen außerhalb des Schrankes zeigen.

Für andere Stufen im Verteilungsverlauf, gefolgt von einem senkrechten oder leicht geneigten Verteilungsanstieg, sind die Fälle verantwortlich, in denen die manuelle Brandbekämpfung mit CO₂- bzw. Pulver-Handfeuerlöschgeräten nicht innerhalb von 900 Sekunden zum Löscherfolg geführt hat. Wenn nach 900 Sekunden eine Brandbekämpfung über Wandhydranten und Feuerlöschschläuche mit Wasser erfolgt, wird die Zeit des Löscherfolgs abgeleitet aus der Temperatur zum Zeitpunkt des Beginns der manuellen Brandbekämpfung mit transportablen Feuerlöschern zuzüglich der 900 Sekunden (siehe Kapitel 4.5.1 b)). Der Anstieg ist senkrecht, wenn der Beginn der Brandbekämpfung genau auf den Zeitpunkt fällt, bei dem sich Flammen außerhalb des Schrankes zeigen, oder der Löscherfolg sich nach dem CFAST-Temperaturmaximum einstellt. Er ist leicht geneigt, wenn der Beginn der manuellen Brandbekämpfung vor

oder nach diesem Zeitpunkt liegt und das CFAST-Temperaturmaximum noch nicht erreicht wurde. A10, die Ankunftszeit des Rundgängers vor Ort, trägt wie bisher zur Ausdehnung der Verteilung am unteren Ende bei.

Bei Ansprechen von zwei automatischen Brandmeldern reagiert die Warte stets mit der sofortigen Entsendung von Löschkraften und Alarmierung der Werksfeuerwehr. Die Löschkraften sind somit mindestens genau so schnell oder eher vor Ort als ein Erkunder im Falle des Ansprechens von nur einem Brandmelder und können dementsprechend früher einen Löscherfolg herbeiführen. Sie beginnen mit der Löschung spätestens dann, wenn Flammen außerhalb des elektrischen Verteilerschranks erkennbar sind. Außerdem ist bei Ansprechen von zwei automatischen Brandmeldern eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Branderkennung (bevor sich Flammen außerhalb des Schrankes zeigen) angesetzt worden.

Dies führt zu einer weiteren Verschiebung der Verteilungen hin zu niedrigeren Maximaltemperaturen (siehe Abbildung 4.11). Zur Neigung der Verteilungen in Abbildung 4.11 tragen die Meldezeit A6 und die Zeit A17, zu welcher über zusätzliche Störsignale informiert wird, bei.

Wegen der stets stattfindenden Brandbekämpfung deuten hier die breiten Stufen in den Verteilungen mit einem anschließenden senkrechten Verteilungssprung vor allem auf die Fälle hin, bei denen der Brand erst nach Erreichen des Temperaturmaximums des CFAST-Rechenlaufs gelöscht wird oder der Beginn der manuellen Brandbekämpfung auf den Zeitpunkt fällt, bei dem sich Flammen außerhalb des Schrankes zeigen.

Auffällig sind die senkrechten Verteilungsverläufe bis zu einer Maximaltemperatur von 90 °C. Als Ursache hierfür kann zum einen ausgeschlossen werden, dass das CFAST-Temperaturmaximum überschritten wurde, da keiner der Läufe ein so niedriges Maximum aufweist, und zum anderen, dass der Beginn der manuellen Brandbekämpfung zu dem Zeitpunkt erfolgt, wenn Flammen sichtbar sind. Da es eine Wahrscheinlichkeit von 0.25 bis 0.75 gibt, den Brand zu erkennen, bevor er durch Flammen sichtbar wird, wäre ein solcher Verlauf zunächst leicht geneigt und hätte vor dem senkrechten Sprung eine Stufe. Der Grund für diesen senkrechten Verlauf liegt darin, dass der Erfolg der Brandbekämpfung in einen Zeitbereich fällt, in dem der Temperaturverlauf ein temporäres Maximum überschritten hat und für kurze Zeit leicht abfällt.

Abbildung 4.12 zeigt die Verteilungsschar der Maximaltemperaturen für den Fall, dass alle drei im Brandbereich installierten automatischen Brandmelder ansprechen. Die Löschkkräfte werden bereits losgeschickt, wenn zwei der Melder ansprechen. Spricht mit zeitlicher Verzögerung auch der dritte automatische Melder an, so sind die Löschkkräfte, d.h. sowohl Brandersthelfer als auch Werksfeuerwehr, darüber informiert, wenn sie vor Ort sind. Die Einsatzkräfte sind dementsprechend höchst sensibilisiert und erkennen den Brand mit einer hohen Wahrscheinlichkeit. Gegenüber Abbildung 4.12 ist die Anzahl der Verteilungen mit einer breiten Stufe und einem darauf folgenden senkrechten Verteilungssprung geringer geworden. Außerdem treten diese Stufen erst bei einem höheren Wahrscheinlichkeitswert auf. Der Grund dafür liegt darin, dass in diesem Fall der Brand häufiger erkannt wird, schon bevor Flammen aus dem Schrank treten. Der Brand wird also seltener nach Erreichen des Temperaturmaximums des CFAST-Rechenlaufs gelöscht.

Abbildung 4.8 wird im Wesentlichen durch den Mischungsbeitrag aus Abbildung 4.12 bestimmt. Der Verlauf jeder Verteilung in Abbildung 4.8 wird - abgesehen vom Rundgänger - beeinflusst durch die Stochastik in der (relativ kurzen) Ansprechzeit (A_6) der Melder, in der Zeit, wann über mögliche zusätzliche Störsignale informiert wird, und durch das zufällige Ereignis der Branderkennung, wenn noch keine Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur ist zurückzuführen auf das zufällige Ereignis, ob gelöscht wird, und die zufälligen Unterschiede im Löschzeitpunkt. Abbildung 4.13 zeigt hierzu die Stichprobe von 100 (möglicherweise zutreffenden) Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Löschzeitpunkte im Kontrollvolumen 1. Ein Löschzeitpunkt bei 6000 Sekunden weist darauf hin, dass keine Brandlöschung stattgefunden hat. Der Wahrscheinlichkeitsbeitrag ergibt sich hauptsächlich aus der Situation, wenn kein Melder meldet. Bei 90 % der Verteilungen in Abbildung 4.13 liegt der Löschzeitpunkt, der mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 0.9 nicht überschritten wird, ungefähr zwischen 550 und 2300 Sekunden.

Die breiten Stufen in den Verteilungen deuten auf eine Verzögerung im Löscherfolg hin, wenn der Löschrupp den Brand nicht sofort erkennt. Der senkrechte Verteilungssprung danach ergibt sich aus der Modellierung. Wenn der Beginn der manuellen Brandbekämpfung auf den als ungenau bekannt angegebenen Zeitpunkt fällt, zu welchem Flammen aus dem Schrank treten, so ist die Temperatur zu diesem Zeitpunkt und damit die daraus abgeleitete Zeit des Löscherfolgs ebenfalls ungenau bekannt und

unterliegt keiner stochastischen Variation. Der leicht geneigte Verteilungsanstieg danach deutet auf Fälle hin, bei denen die Löschkräfte den Brand zunächst nicht erkennen, dann von der Warte her über zusätzliche Störsignale informiert werden (A8, A9), somit nach einer kurzen Zeit den Brand entdecken und mit der manuellen Brandbekämpfung beginnen.

Abbildung 4.8 zeigt, dass die Aussage „Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur zum spezifischen Brandszenario“, nur sehr ungenau gemacht werden kann. Grund dafür sind die epistemischen Unsicherheiten in Tabelle 4.2. Die Sensitivitätsanalyse gibt Aufschluss darüber, welche dieser Unsicherheiten am meisten zur Breite der Verteilungsschar beiträgt. Als Sensitivitätsmaße werden die standardisierten Rangregressionskoeffizienten der epistemischen Unsicherheiten B1 bis B33 gewählt.

Abbildung 4.14 ist zu entnehmen, dass eine brauchbare Sensitivitätsaussage nur im Temperaturbereich zwischen etwa $T_{\max} = 85\text{ °C}$ und $T_{\max} = 240\text{ °C}$ möglich ist. Nur in diesem Bereich erklären die Sensitivitätsmaße mehr als 70 % der Variabilität der Wahrscheinlichkeit für Maximaltemperatur kleiner gleich $T_{\max}$. Die Sensitivitätsmaße in den Abbildungen 4.15 bis 4.19 sind als Funktion von $T_{\max}$ zu sehen. Sie beziehen sich auf die kumulative Wahrscheinlichkeit bei $T_{\max}$. Maße mit einem Absolutwert von weniger als 0.2 werden in diesem Fall als nicht signifikant eingestuft. Im Bereich von etwa $T_{\max} = 85\text{ °C}$ bis $T_{\max} = 200\text{ °C}$ erweisen sich die Sensitivitätsmaße zu den unsicheren Korrekturfaktoren B6 und B7 sowie B8 als signifikant. Diese drei epistemischen Unsicherheiten sind der wesentliche Grund für die Breite der Verteilungsschar in Abbildung 4.8 zwischen 85 °C und 240 °C .

Zwischen $T_{\max} = 200\text{ °C}$ und $T_{\max} = 240\text{ °C}$ kommt der Hauptbeitrag zur Unsicherheit der Verteilung der Maximaltemperatur nur noch vom Korrekturfaktor B7. Die Sensitivitätsmaße zu den unsicheren Korrekturfaktoren B6 und B7 haben negative Vorzeichen, d.h. hoher Wert für den unsicheren Korrekturfaktor zur Energiefreisetzung (Brandleistung) aus dem elektrischen Verteilerschrank und zum CFAST-Modellergebnis geht tendenziell einher mit einer niedrigen Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Maximaltemperatur von $T_{\max}$ nicht überschritten wird. Das Sensitivitätsmaß zu dem unsicheren Zeitpunkt für das Maximum der Energiefreisetzung (B8) ist stets positiv, d.h. späte Zeitpunkte gehen tendenziell einher mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für eine Maximaltemperatur kleiner gleich $T_{\max}$. Das ist dadurch zu erklären, dass Temperaturverläufe zu einem späten Maximum der Energiefreisetzung aufgrund der Branddyna-

mik zu späterer Zeit maximale Heißgasschichttemperaturen erreichen und damit zu einer höheren Wahrscheinlichkeit für eine Maximaltemperatur $\leq T_{\max}$ beitragen.

Zwischen $T_{\max} = 85\text{ °C}$ und $T_{\max} = 90\text{ °C}$ erweisen sich die Sensitivitätsmaße bzgl. der standardisierten Rangregressionskoeffizienten zu B13 und B14 als signifikant in entgegengesetzter Richtung. (B13 und B14 stehen für die ungenau bekannten Wahrscheinlichkeiten der Branderkennung, wenn noch keine Flammen außerhalb des Schrankes erkennbar sind, und ein bis zwei bzw. drei Melder ansprechen.) Dieses Ergebnis ist eine Folge der Numerik, wie sie im Fall starker Abhängigkeit zwischen zwei unsicheren Parametern auftreten kann (Korrelation von 0.85 zwischen B13 und B14). Der Rangkorrelationskoeffizient als Sensitivitätsmaß in Abbildung 6.16 zeigt, dass der Beitrag zur Unsicherheit der Maximaltemperatur sowohl bzgl. B13 als auch bzgl. B14 vernachlässigbar ist.

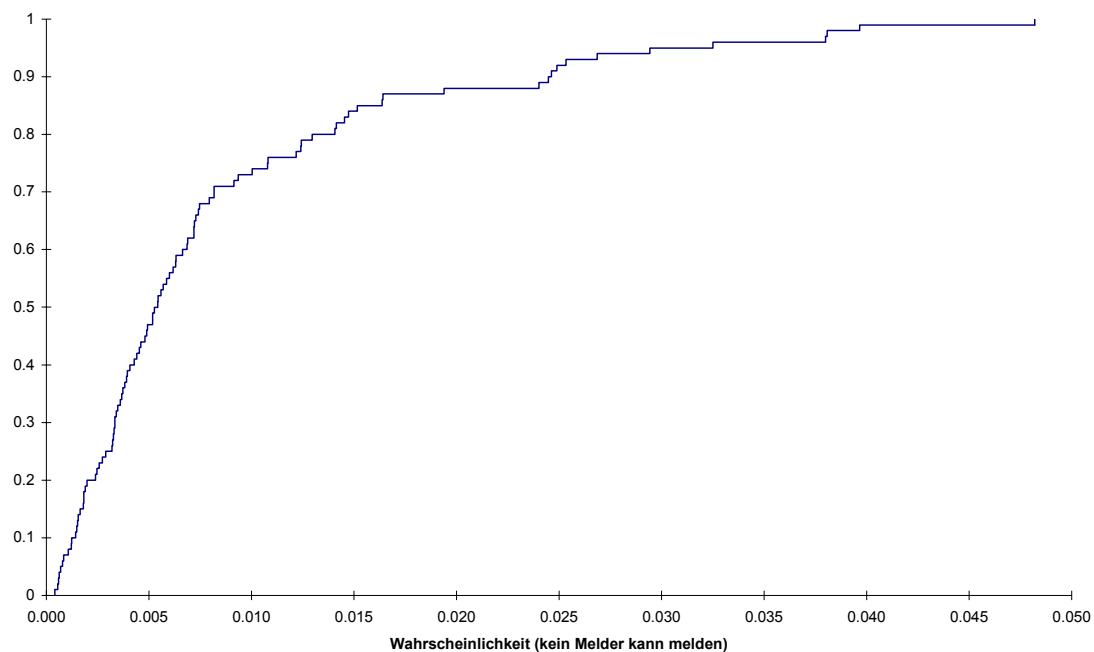


Abb. 4.4 Empirische subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wahrscheinlichkeit für „Ansprechen von keinem Brandmelder“

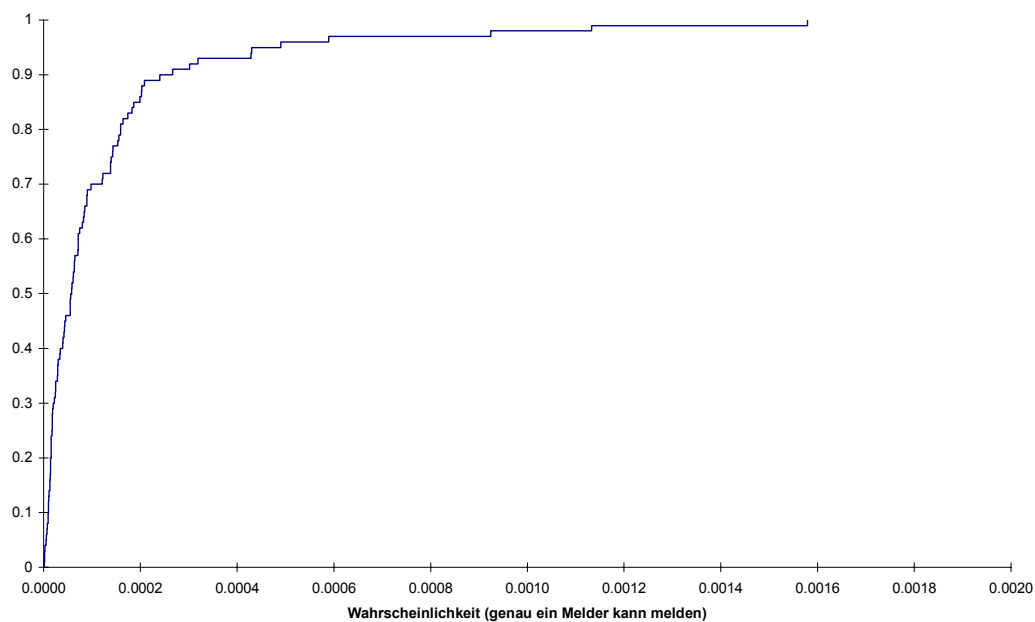


Abb. 4.5 Empirische subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wahrscheinlichkeit für „Ansprechen genau eines Brandmelders“

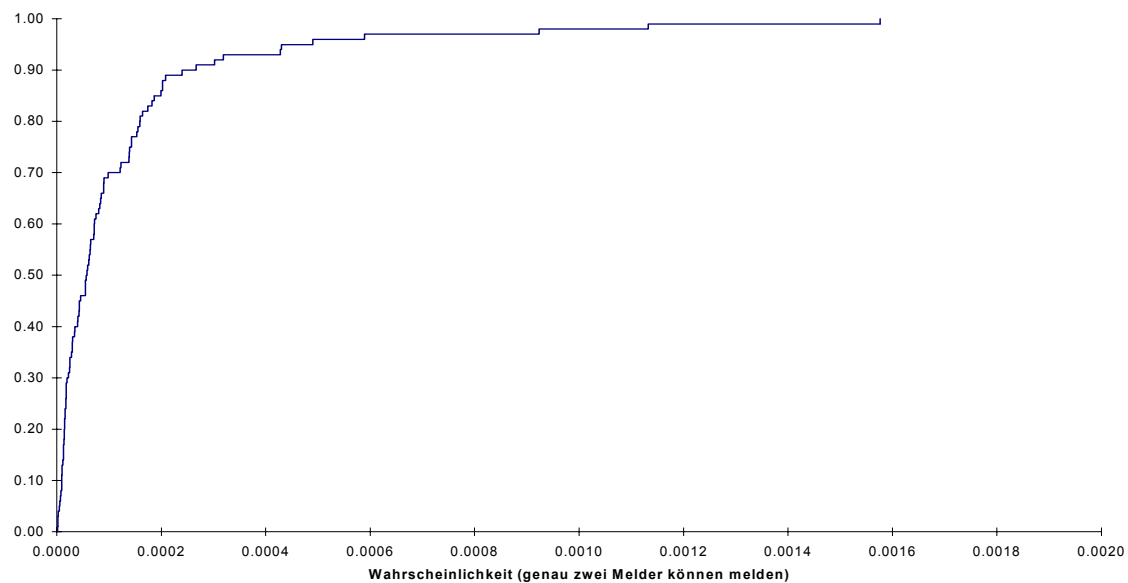


Abb. 4.6 Empirische subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wahrscheinlichkeit für „Ansprachen von genau zwei Brandmeldern“

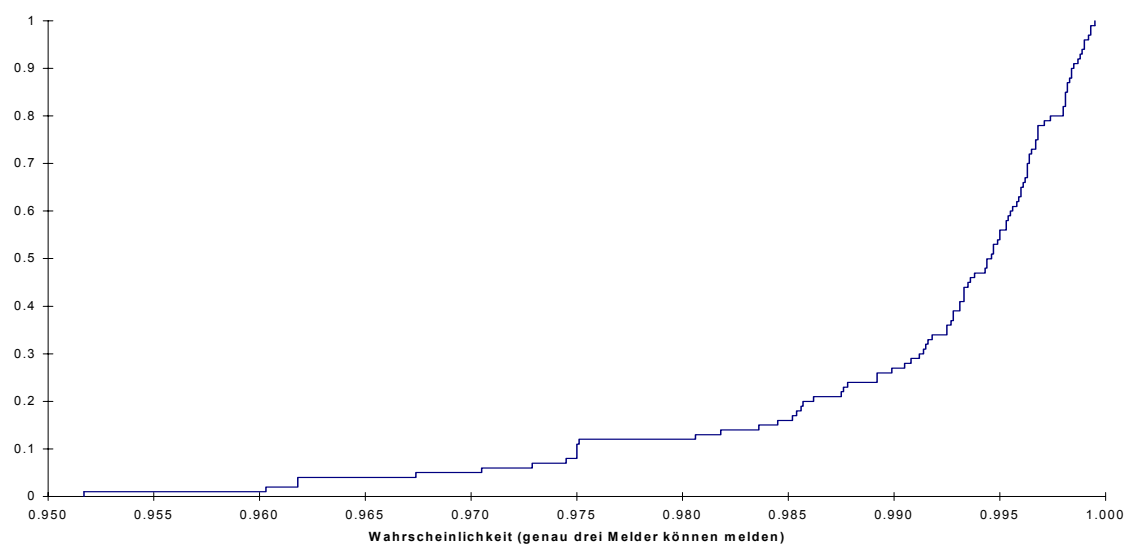


Abb. 4.7 Empirische subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wahrscheinlichkeit für „Ansprachen aller drei Melder“

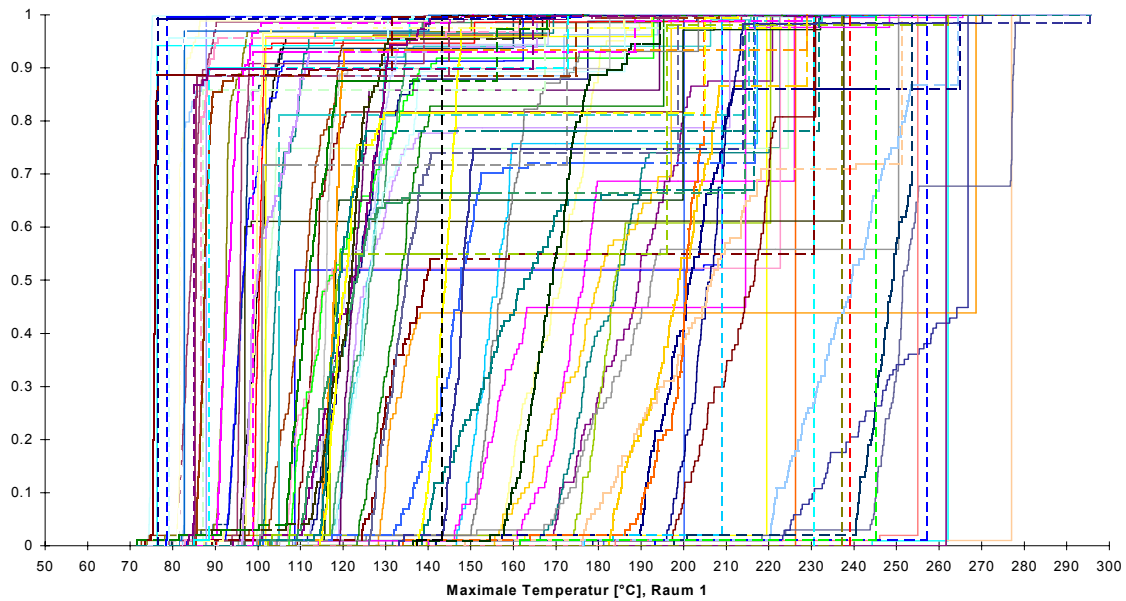


Abb. 4.8 Epistemische Unsicherheit über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen

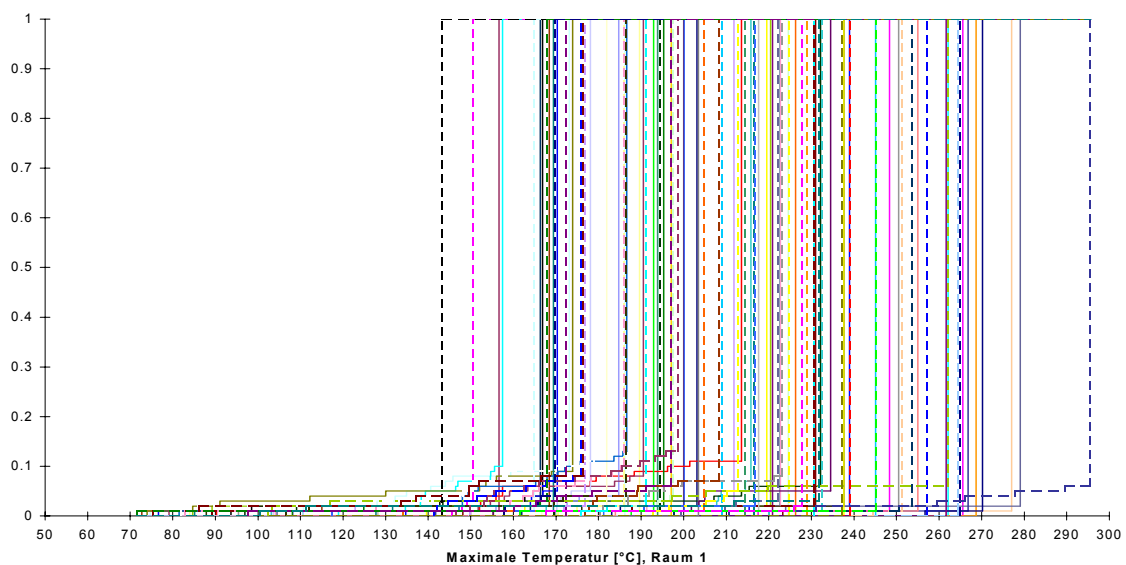


Abb. 4.9 Epistemische Unsicherheit über die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1 unter der Bedingung „Ansprechen keines Brandmelders“, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen

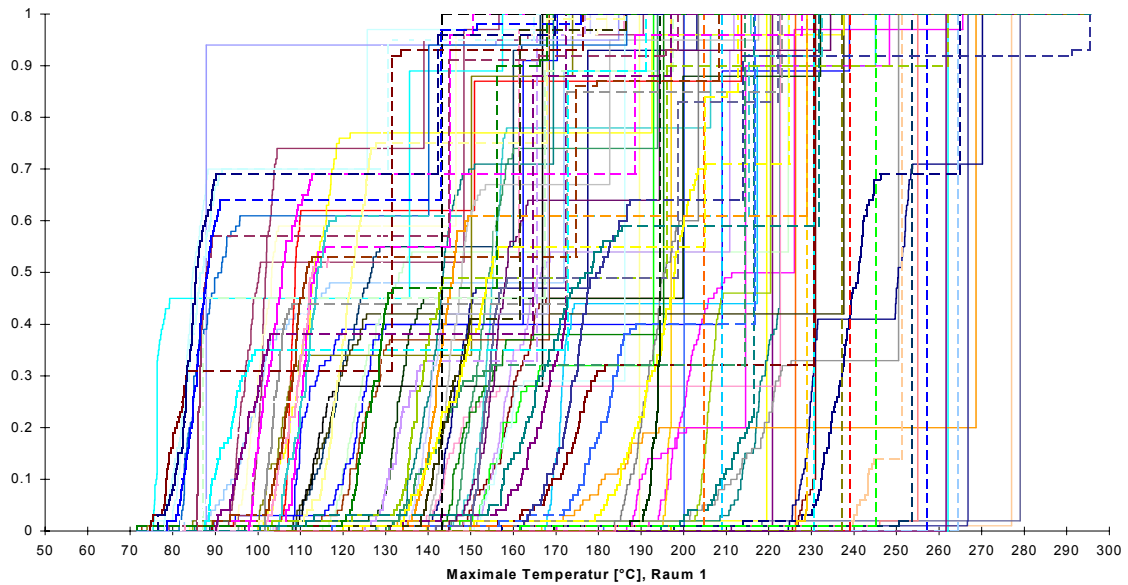


Abb. 4.10 Epistemische Unsicherheit über die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1 unter der Bedingung „Ansprechen genau eines Brandmelders“, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen

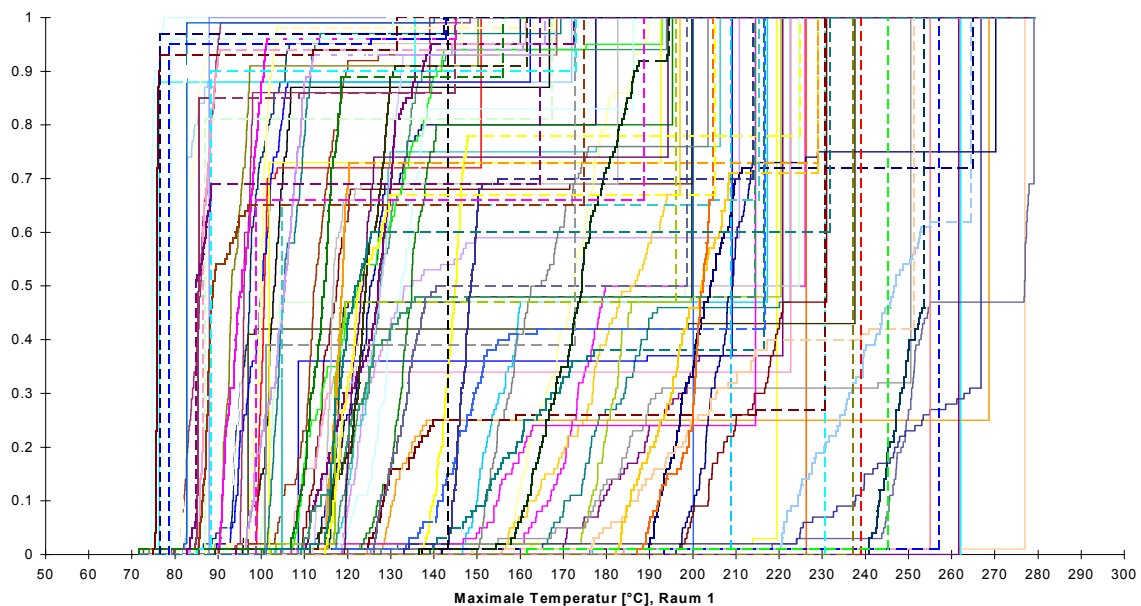


Abb. 4.11 Epistemische Unsicherheit über die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1 unter der Bedingung „Ansprechen von zwei Brandmeldern“

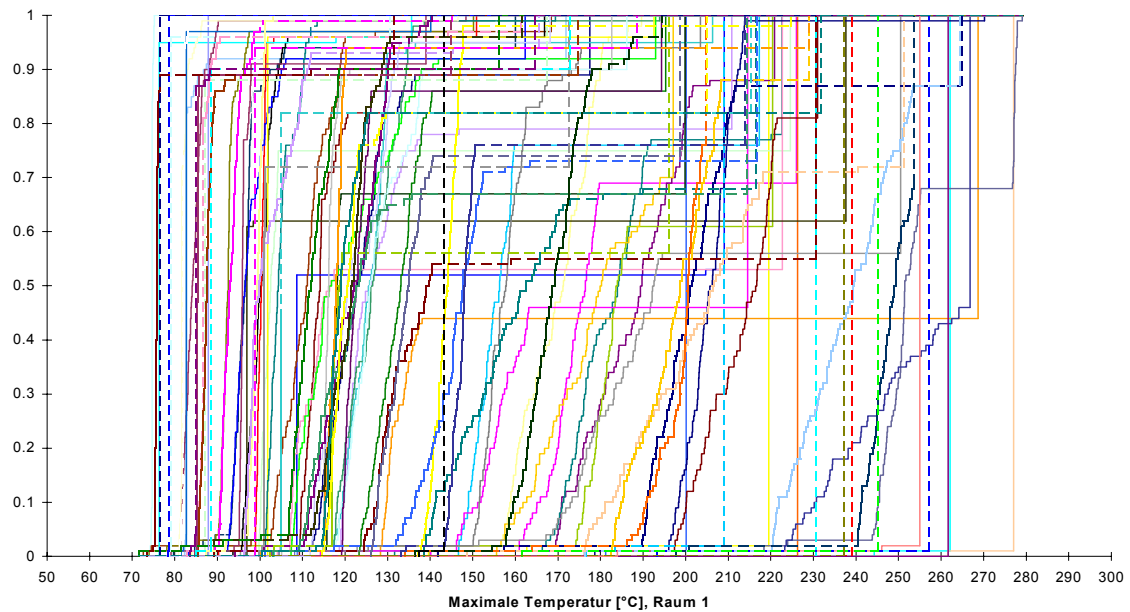


Abb. 4.12 Epistemische Unsicherheit über die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1 (unter der Bedingung „Ansprechen aller drei Brandmelder“, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen

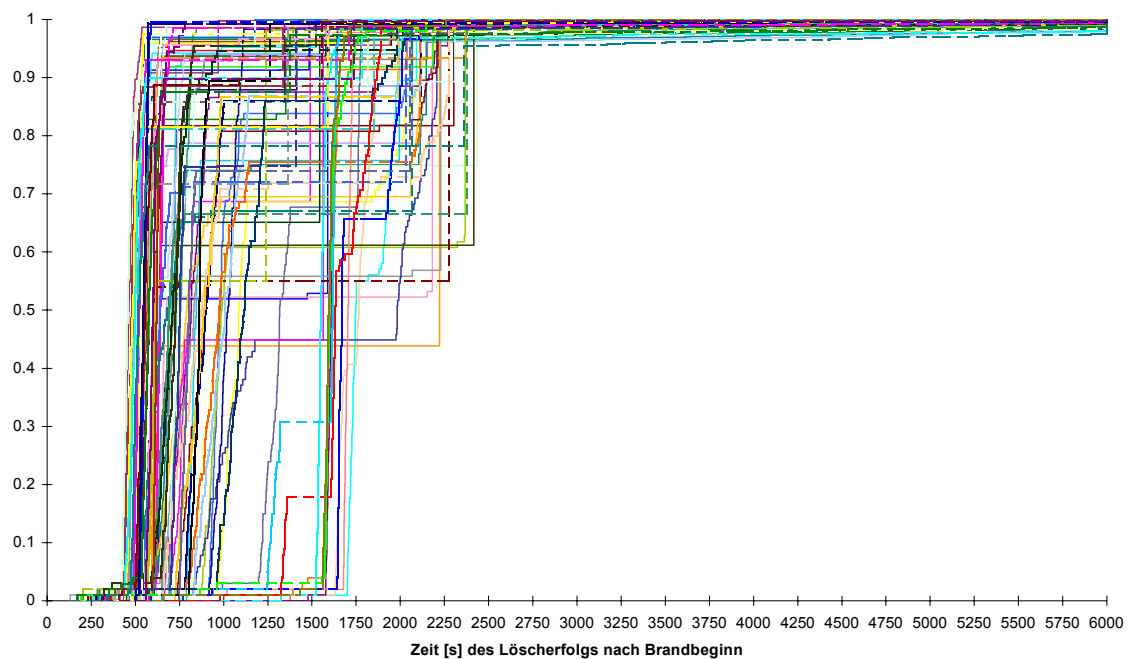


Abb. 4.13 Epistemische Unsicherheit über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Löszeitpunkte im Kontrollvolumen 1, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen

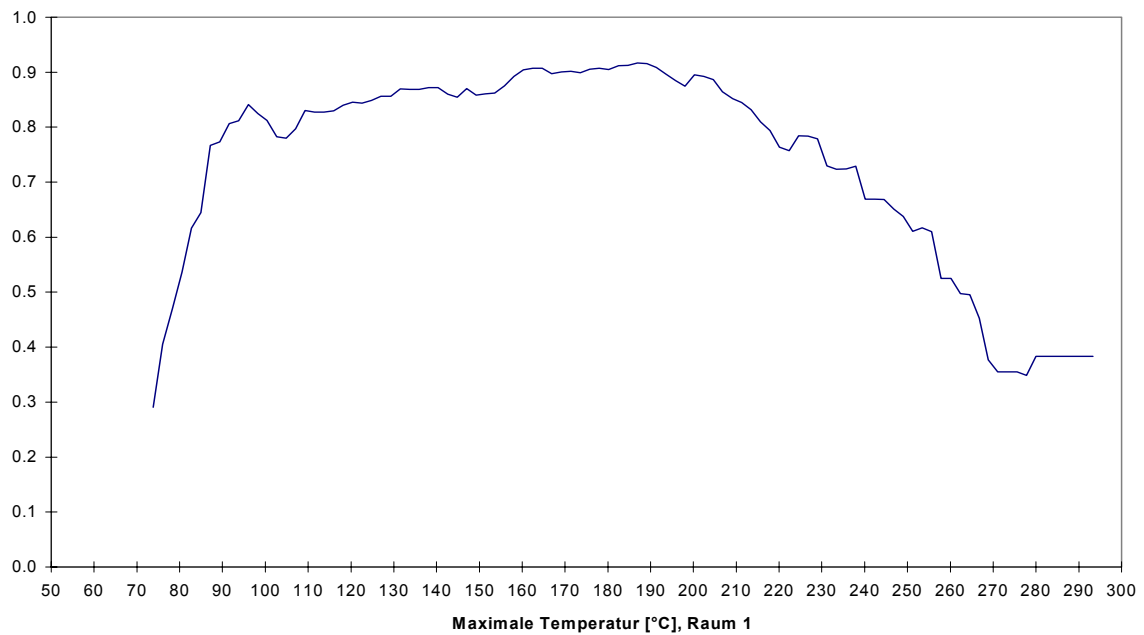


Abb. 4.14 R^2 -Wert zu den Sensitivitätsmaßen in Abbildungen 4.15 bis 4.18

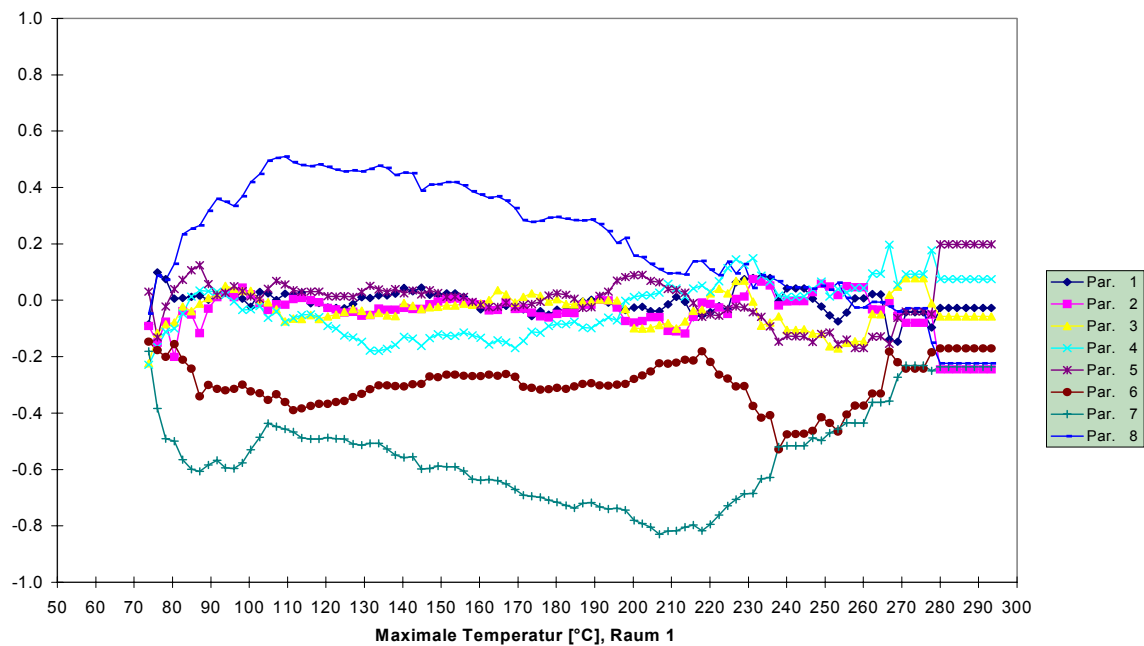


Abb. 4.15 Standardisierte Rangregressionskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B1-B8)

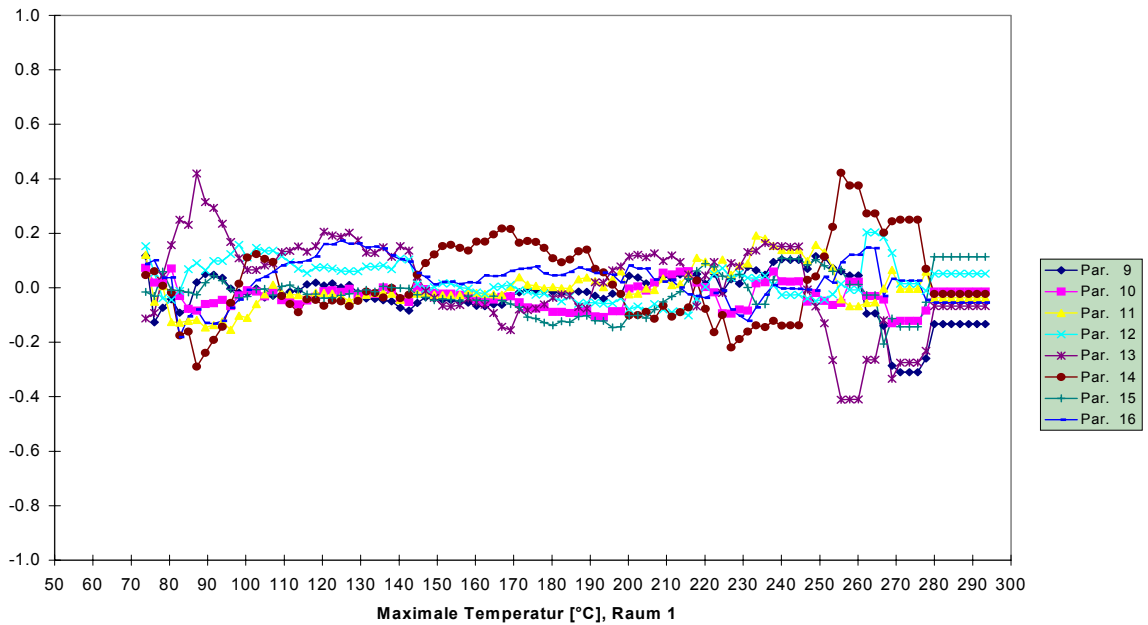


Abb. 4.16 Standardisierte Rangregressionskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B9-16)

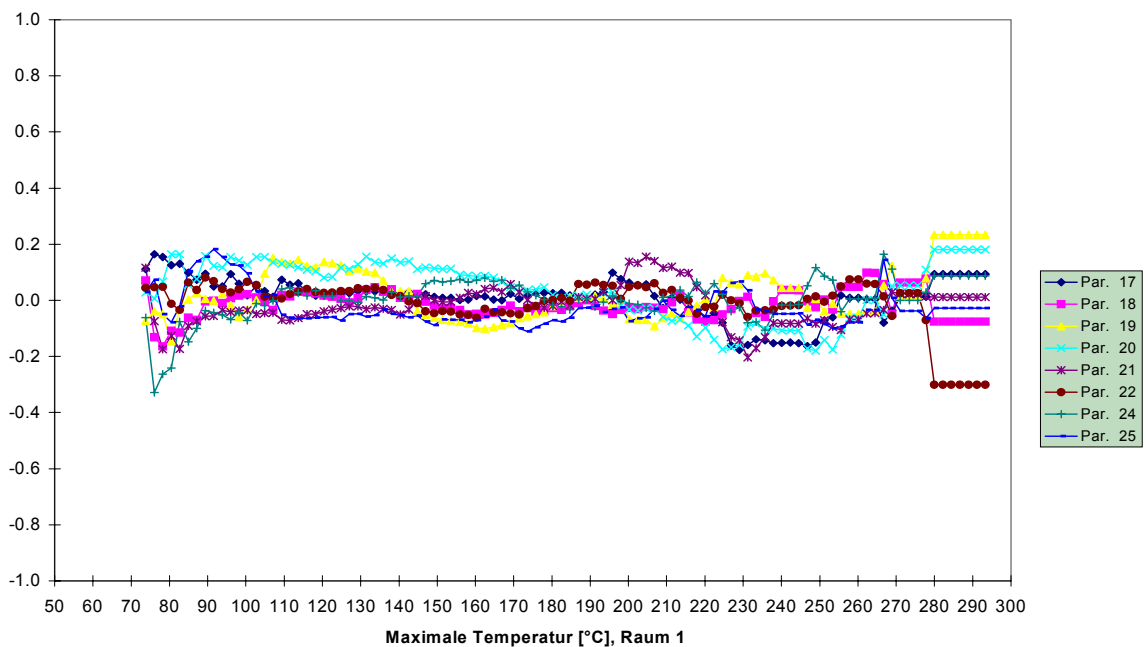


Abb. 4.17 Standardisierte Rangregressionskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B17-B25)

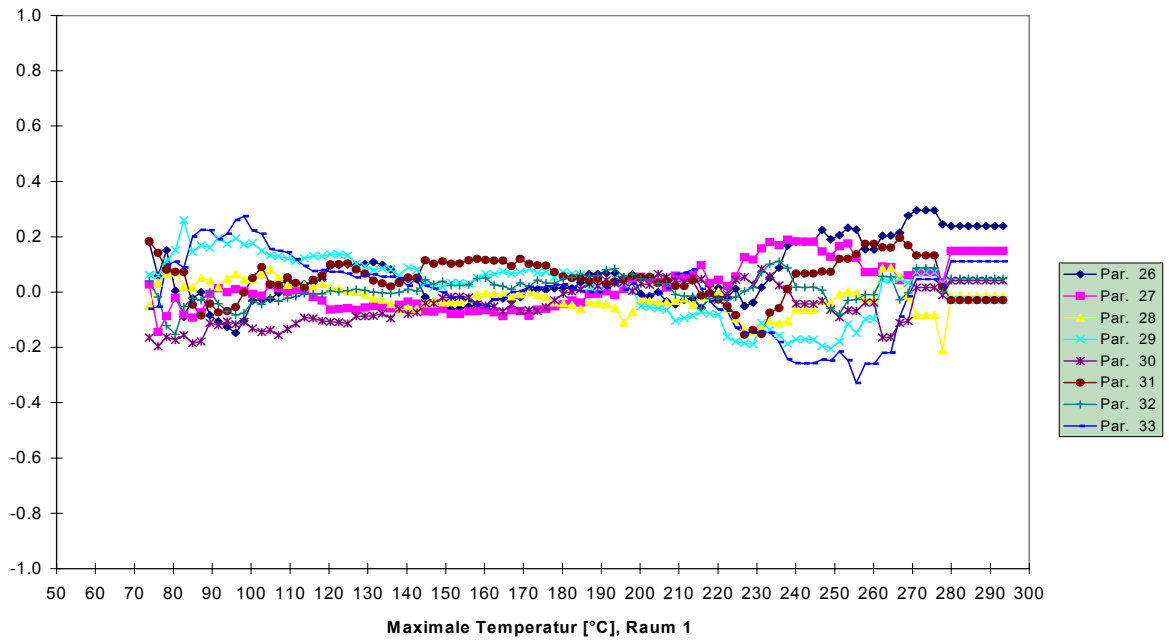


Abb. 4.18 Standardisierte Rangregressionskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B26-B33)

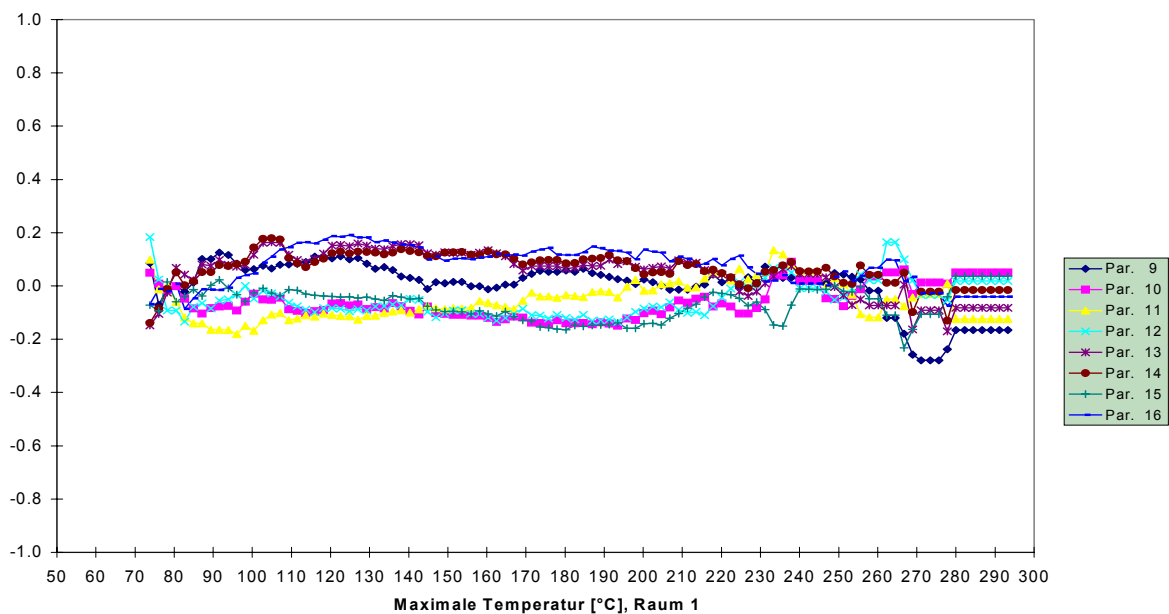


Abb. 4.19 Rangkorrelationskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B9-16)

4.7 Zusammenfassung

In Kapitel 4 wurde zum ersten Mal die Kopplung von Stochastik und Dynamikrechnung einschließlich Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen für die Ermittlung von Aussagen zu einem Brandszenario beschrieben und realisiert. Auf diese Weise werden Wahrscheinlichkeitsaussagen einschließlich von Unsicherheitsangaben zur weiteren Verarbeitung in der PSA zur Verfügung gestellt. Die erzielten Wahrscheinlichkeitsaussagen berücksichtigen den Einfluss der Dynamik (wie im Brandsimulationscode CFAST modelliert) auf die Stochastik. Darüber hinaus wird aber auch dem Einfluss der Stochastik auf die zeitliche Entwicklung, etwa der Heißgasschichttemperatur in verschiedenen Räumen, Rechnung getragen.

Mit diesem Vorgehen kann beispielsweise die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der eine, für bestimmte sicherheitstechnisch relevante Einrichtungen als kritisch angenommene Temperatur über eine Mindestzeitdauer in einem bestimmten Raumbe- reich ansteht. Weiterhin lässt sich bestimmen, wie gut diese Wahrscheinlichkeit allein aufgrund der Angaben zu Parameter- und Modellunsicherheiten in der dynamischen Rechnung und in der stochastischen Modellierung ist. Die darüber hinaus ermittelten Sensitivitätsmaße geben an, woher die wichtigsten Beiträge zur Unsicherheit der er- mittelten Wahrscheinlichkeitswerte kommen. Daraus wird unmittelbar ersichtlich, wo der Kenntnisstand primär verbessert werden sollte, wenn es darum geht, die Unsicher- heit der Aussagen möglichst effektiv zu reduzieren, d.h. ihre Aussagekraft zu erhöhen.

Für das zur Erprobung der Methode für eine Referenzanlage vom Typ Konvoi ausge- wählte Szenario eines in einem elektrischen Verteilerschrank entstandenen Kabel- brandes innerhalb des Sicherheitsbehälters handelt es sich vor allem um Kenntnis- standunsicherheiten zum Brandverhalten. Speziell sind dies Unsicherheiten zur Energiefreisetzungsrate aus dem real vorhandenen elektrischen Verteilerschrank sowie zur Wahrscheinlichkeit der Branderkennung, wenn zwar automatische Brandmeldeeinrichtungen angesprochen haben, der Brand aber noch nicht durch Flammen bzw. sichtbaren Rauch vom Mensch zu erkennen ist. Hier bestehen sicher- lich Möglichkeiten, den Kenntnisstand - gegebenenfalls mit einem nicht unerheblichen Aufwand - zu verbessern. Sofern erforderlich, lässt sich die Aussagekraft der Ergebnisse der PSA zu Brand nach einer solchen Unsicherheits- und Sensitivitätsana- lyse erhöhen. Die Ergebnisse derartiger Untersuchungen repräsentieren auch einen Maßstab für die Aussagekraft der PSA-Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die

unsicheren Parameter, deren Kenntnisstand sich nicht bzw. nicht ohne weiteres verbessern lässt.

5 Schlussfolgerungen

Durch die Arbeiten des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsvorhabens zur Entwicklung fortschrittlicher Methoden für probabilistische Sicherheitsanalysen /GRS 98/ wurden unter anderem Untersuchungen zur Verbesserung des methodischen Herangehens bei der Analyse des übergreifenden anlageninternen Ereignisses Brand ermöglicht.

Die in den Kapiteln 2 und 4 beschriebenen Vorgehensweisen konnten mittlerweile erfolgreich im Rahmen einer PSA der Stufe 2 für ein deutsches Kernkraftwerk neuester Bauart vom Typ Konvoi praktisch erprobt werden. Die entsprechenden Ergebnisse sind in /HAI 02a/ enthalten. Diese neuen Methoden werden aktuell auch im Rahmen probabilistischer Untersuchungen für eine Siederwasserreaktoranlage älterer Bauart (vom Typ SWR-Baulinie 69) genutzt. Die systematisierte Vorgehensweise zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeit lokale Entstehungsbrände wurde, wie in Kapitel 3 erläutert, dort für die kritischen Raumbereiche erstmalig umgesetzt.

In der nachfolgenden Übersicht wird noch einmal zusammenfassend dargestellt, welche methodischen Verbesserungen bei den drei Hauptarbeitsschritten einer Brand-PSA durch das Vorhaben erzielt wurden:

Auswahlverfahren

Der erste Arbeitsschritt einer probabilistischen Brandanalyse ist das Auswahlverfahren, oft auch screening genannt. Auf der Grundlage umfassender Informationen zu allen brandspezifischen Belangen für alle Räume des zu untersuchenden Gebäudes der Anlage ist eine Auswahlmenge von Räumen zu bestimmen, für welche brandspezifische und probabilistische Detailanalysen durchzuführen sind.

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine standardisierte Vorgehensweise zur Durchführung eines solchen Auswahlverfahrens abgeleitet. Diese Vorgehensweise beinhaltet eine systematisch strukturierte Ablage von Primärinformationen in einer Datenbank sowie die automatische Berechnung von Raumrangfolgen bzgl. ihrer Brandrelevanz auf der Grundlage dieser Informationen. Die Raumrangfolgen beziehen sich auf die Kenngrößen Brandbelastung, Brandeintrittshäufigkeit und Brandausbreitungsmöglichkeiten. Die lokalen Brandeintrittshäufigkeiten werden dabei generisch mittels der Methode von Berry ermittelt.

Ableitung und Berechnung brandspezifischer Ereignisabläufe

Brandspezifische Ereignisabläufe sind nur für die Räume der Auswahlmenge aufzustellen. Für diese Räume sind die jeweiligen Brandeintrittshäufigkeiten zu bestimmen, Brandsimulationsrechnungen mit deterministischen Computercodes für ausgewählte Brandszenarien durchzuführen sowie die anlagenspezifischen Möglichkeiten von Branderkennung, -meldung und –bekämpfung zu analysieren. Nach Ableitung der brandspezifischen Ereignisabläufe lassen sich die bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Endzustände berechnen.

Im Rahmen des Vorhabens wurde zum einen eine systematische Vorgehensweise zur Bestimmung anlagenspezifischer Brandeintrittshäufigkeiten abgeleitet. Weiterhin wurde erstmals ein Brandsimulationscode (hier: das Zonenmodell CFAST) mit den anlagenspezifischen Möglichkeiten der Brandmeldung zur Berechnung von Wahrscheinlichkeiten von brandbedingten Ausfällen gekoppelt. Auf der Grundlage von Unsicherheiten für die Modelleingaben sowohl epistemischer als auch aleatorischer Natur wurden erstmalig in diesem Zusammenhang Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt und ausgewertet.

Ableitung und Berechnung systemtechnischer Ereignisabläufe und Einbindung in die PSA

Die Eintrittshäufigkeiten für die in der PSA vorhandenen oder neu abzuleitenden systemtechnischen Ereignisbäume bestimmen sich aus den Wahrscheinlichkeiten der Endzustände der brandspezifischen Ereignisabläufe.

Durch die im Rahmen des Vorhabens erzielten Ergebnisse der Unsicherheitsanalysen bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für die Endzustände der brandspezifischen Ereignisabläufe ist jetzt eine durchgängige Methodik zur Unsicherheitsanalyse bei Brand-PSA verfügbar.

6 **Literatur**

- /APO 85/ Apostolakis, G.E.
Some Probabilistic Aspects of Fire Risk Analysis for Nuclear Power Plants
Symposium on Fire Safety Science, Maryland, 1985
- /APO 93/ Apostolakis, G.E.
Fire Risk Assessment and Management in Nuclear Power Plants,
Fire Science and Technology, 13 (1993) 12-39, 1993
- /BER 79/ Berry, D.L.; Minor, E.E.
Nuclear Power Plant Fire Protection, Fire Hazards Analysis
NUREG/CR-0654, SAND 79-0324, September 1979
- /BEZ 94/ A Regulatory Evaluation of the BEZNAU Risk Assessment
Part I: Level 1, ERI/HSK 94-301, HSK 15/160, Juli 1994
- /BRE 99/ Brenig, H.-W.; Sommerfeld, H. (RMB)
Erweiterte PSA der Stufe 2 im Hinblick auf die Behandlung übergreifender
Einwirkungen und die Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten am Beispiel
einer Konvoi-Anlage
a) Ergebnisbericht Phase 1 (Simulationsrechnungen mit CFAST)
b) Ergebnisbericht Phase 2 (probabilistische Untersuchungen)
Zuarbeit zum Arbeitspunkt 5 des Vorhabens SR2276, März 1999
- /CHA 98/ Chabot, J.L., et al.
Hybrid Monte Carlo simulation using Petri nets and fire code for analysing
fire scenarios in nuclear power plants, in: A. Mosleh and R.A. Bari, eds.,
Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM4, Vol. 2,
Springer-Verlag London Ltd., 1998
- /CZA 99/ Czakó, S. et al
Fire PSA for NPP Paks in Hungary, in: Safety and Reliability, Schueller &
Kafka (eds) Balkema, 1999.

- /DEY 98/ Dey, M.
Technical Review of Risk-Informed, Performance-Based Methods for Nuclear Power Plant Fire Protection Analyses , Draft Report for Comment, NUREG-1521, Juli 1998
- /FAK 97/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke
Daten zur Quantifizierung von Ereignisablaufdiagrammen und Fehlerbäumen, Stand: April 1997, BfS-KT 18/97, Juni 1997
- /FAS 01/ Fasel, H.-J., Türschmann, M., Röwekamp, M.
Die Auswahl kritischer Brandbereiche bei probabilistischen Brandanalysen GRS-A-2835, April 2001
- /GOE 99/ Periodische Sicherheitsüberprüfung für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken
Zusammenfassung, Ergebnisse und Bewertung, HSK 17/400, Würenlingen, November 1999,
www.hsk.psi.ch/publikationen/psu/psu_kkg.pdf
- /GRS 90/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, Verlag TÜV Rheinland, 1990
- /GRS 93/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
SWR-Sicherheitsanalyse, GRS-102, Juni 1993
- /GRS 98/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Entwicklung fortschrittlicher Methoden für eine probabilistische Sicherheitsanalyse insbesondere der Stufe 2, Vorhabensbeschreibung; GRS, 1998
- /HAI 02/ Haider, C., et al
Unsicherheitsanalysen zu einem Kabelbrandszenario im Sicherheitsbehälter einer Konvoi-Anlage, GRS-A-2889, Januar 2002

- /HAI 02a/ Haider, C. et al
Erweiterte PSA der Stufe 1 im Hinblick auf die Behandlung übergreifender Einwirkungen und die Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten am Beispiel einer Anlage vom Typ Konvoi, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-2002-592, ISSN 0724-3316, 2002
- /HAE 83/ Härtler, G.
Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse, Berlin, 1983
- /HOC 81/ Hockenbury, R.W. et al
Occurrence Rates of Fires in Nuclear Power Plants
Nuclear Engineering and Design 66 (1981) 233-240, 1981
- /HOF 96/ Hofer, E.
When to separate uncertainties and when not to separate,
Reliability Engineering and System Safety 54, pp. 113-118, 1996
- /HOU 97/ Houghton, James R.
Special Study Fire Events - Feedback of U.S. Operating Experience, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Juni 1997
- /IAE 98/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Treatment of Internal Fires in Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Reports Series No. 10, Wien, 1998
- /IPS 00/ Institute de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN)
Methodology used by IPSN to estimate frequency of fires, September 2000
- /KLS 00/ Kloos, M., Hofer, E.
SUSA-AB, A Program System for Uncertainty and Sensitivity Analysis Including Type A and Type B Uncertainties, Version 1.0, User's Guide and Tutorial, Garching, Mai 2000

- /KRZ 94/ Krzykacz, B., Hofer, E., Kloos, M.
A Software System for Probabilistic Uncertainty and Sensitivity Analysis of Results from Computer Models, in: G.E. Apostolakis, J.S. Wu (Eds.), Proceedings of PSAM-II, San Diego, March 20-25, 1994, Vol. 2, Session 63, 1994
- /KTA 99/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
KTA 2101: Brandschutz in Kernkraftwerken: Teil 1: Grundlagen, Regelentwurf, 1999
- /LAB 00/ Labeau, P.E., Smidts, C., Swaminathan, S.
Dynamic reliability: towards an integrated platform for probabilistic risk assessment, Reliability Engineering & System Safety 68 (219-254), 2000
- /MAN 94/ Mangs, J., Keski-Rahkonen, O.
Full scale fire experiments on electronic cabinets I, Espoo: Technical Research Centre of Finland (VTT Publications 186), 1994
- /MAN 96/ Mangs, J., Keski-Rahkonen, O.
Full scale fire experiments on electronic cabinets II, Espoo: Technical Research Centre of Finland (VTT Publications 269), 1996
- /MOW 92/ Mowrer, F.W.
Methods of Quantitative Fire Hazard Analysis, EPRI TR-100443, Research Project 3000-37, Mai 1992
- /NOW 01/ Nowlen, S.P.; Kazarians, M.; Wyant, F.
Risk Methods Insights Gained From Fire Incidents, NUREG/CR-6738, SAND2001-1676P, September 2001
- /NRC 79/ United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC)
Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to January 1, 1979 , Appendix R to 10 CFR (Code of Federal Regulations) Part 50, 1979,
http://www.nrc.gov/NRC/REACTOR/FIRE_PROTECTION/appendixr.html

- /NRC 90/ United States Nuclear Regulatory Commission (US NRC)
Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, NUREG-1150, Dezember 1990
- /NRC 97/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (US NRC)
Individual Plant Examination Program, Perspectives on Reactor Safety and Plant Performance, NUREG-1560, Dezember 1997
- /NRC 98/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Office of Nuclear Regulatory Research
Regulatory Guide 1.174, Washington, Juli 1998
- /OEC 00/ Organisation for Economic Co-Operation And Development (OECD) / Nuclear Energy Agency (NEA)
Fire Risk Analysis, Fire Simulation, Fire Spreading and Impact of Smoke and Heat on Instrumentation Electronics, OECD NEA/CSNI/R(99)27, März 2000
- /PAR 96/ Parry, G. W.
The characterization of uncertainty in Probabilistic Risk Assessment of complex systems, Reliability Engineering and System Safety 54, pp. 119-126, 1996
- /PEA 97/ Peacock, R. D., et al.
CFAST, the Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, NIST Technical Note 1299, U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology (NIST), 1997
- /PEA 97a/ Peacock, R. D., et al.
A User's Guide for FAST Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport, National Institute of Standards and Technology (NIST), 1997
- /PLC 91/ Professional Loss Control (PLC) Inc.
Fire Induced Vulnerability Evaluation Methodology (FIVE), Plant Screening Guide, EPRI Contract-No. RP 3000-41, EPRI TR-100370, April 1991

- /ROE 00/ Röwekamp, M., Oltmanns, S.
Ermittlung kernkraftwerksspezifischer Zuverlässigkeitskenngrößen für Brandschutzeinrichtungen in einem älteren Kernkraftwerk und in einer Konvoi-Anlage, GRA-A-2836, Dezember 2000
- /ROE 01/ Röwekamp, M., Berg, H. P.
German Experience from Reportable NPP Fire Events in NPPs and Lessons Learned, Safety Assessment of Nuclear Power Plants, IAEA-711-J7-TC.1184 2001, IAEA/NSNI, Wien, 2001
- /ROE 97/ Röwekamp, M., Riekert, T., Sehrbrock, W.
Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen für Brandschutzeinrichtungen in deutschen Kernkraftwerken, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1997-486, ISSN 0724-3316, 1997
- /ROE 99/ Röwekamp, M., Liemersdorf, H.
Operating Experience of Fire Dampers in Nuclear Power Plants in Germany, Proceedings of 3rd International Conference Fire & Safety '99, p. 1-14, Wilmington Publishing Ltd., Dartford, 1999
- /SWA 83/ Swain, A.D., Guttman, H.E.
Handbook of Human Reliability, Analysis with Emphasis on Nuclear Power Applications, Final Report, NUREG/CR 1278, 1983
- /TUE 02/ Türschmann, M.; Röwekamp, M.
Sicherheitsindikatoren zur Erkennung von Änderungen des brandschutz-technischen Sicherheitsniveaus, GRS-A-3031, Juni 2002
- /TUE 02a/ Türschmann, M.; Röwekamp, M.
Die Bestimmung anlagenspezifischer Eintrittshäufigkeiten von Entstehungsbränden in Räumen von Kernkraftwerken, GRS-A-2977, Juni 2002

7 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2.1	Brandspezifischer Ereignisablauf für den Auswahlprozess.....	11
Abb. 2.2	Eingabedaten zur Berechnung von Brandeintrittshäufigkeiten und brandspezifischen Ereignisabläufen im Auswahlprozess.....	12
Abb. 2.3	Verzweigung Brandmeldung im brandspezifischen Ereignisablauf (Auswahlprozess).....	16
Abb. 2.4	Anzeige Berechnung Brandauswirkungsdiagramm eines Raumes	19
Abb. 2.5	Darstellung der Anzeige für die Berechnung der Eintrittshäufigkeit eines Raumes	23
Abb. 3.1	Bedingte Eintrittshäufigkeit eines Kernschadenzustandes infolge Brand.....	29
Abb. 3.2	Bestimmung lokaler Brandeintrittshäufigkeiten	49
Abb. 3.3	Modellbildung zur Brandentstehung.....	52
Abb. 4.1	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Heißgasschichttemperatur, ab welcher Störsignale auftreten.....	79
Abb. 4.2	Erforderliche Zeit zur Brandbekämpfung in Abhängigkeit von Temperatur der Heißgasschicht und Löschmittel.....	79
Abb. 4.3	Räumliche Diskretisierung für die CFAST-Modellierung	92
Abb. 4.4	Empirische subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wahrscheinlichkeit für „Ansprechen von keinem Brandmelder“.....	105
Abb. 4.5	Empirische subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wahrscheinlichkeit für „Ansprechen genau eines Brandmelders“.....	105
Abb. 4.6	Empirische subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wahrscheinlichkeit für „Ansprechen von genau zwei Brandmeldern“	106
Abb. 4.7	Empirische subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wahrscheinlichkeit für „Ansprechen aller drei Melder“.....	106
Abb. 4.8	Epistemische Unsicherheit über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen.....	107

Abb. 4.9	Epistemische Unsicherheit über die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1 unter der Bedingung „Ansprechen keines Brandmelders“, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen.....	107
Abb. 4.10	Epistemische Unsicherheit über die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1 unter der Bedingung „Ansprechen genau eines Brandmelders“, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen	108
Abb. 4.11	Epistemische Unsicherheit über die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1 unter der Bedingung „Ansprechen von zwei Brandmeldern"	108
Abb. 4.12	Epistemische Unsicherheit über die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaltemperatur der Heißgasschicht im Kontrollvolumen 1 (unter der Bedingung „Ansprechen aller drei Brandmelder“, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen.....	109
Abb. 4.13	Epistemische Unsicherheit über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Löszeitpunkte im Kontrollvolumen 1, illustriert anhand 100 zufällig ausgewählter Verteilungen.....	109
Abb. 4.14	R^2 -Wert zu den Sensitivitätsmaßen in Abbildungen 4.15 bis 4.18	110
Abb. 4.15	Standardisierte Rangregressionskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B1-B8).....	110
Abb. 4.16	Standardisierte Rangregressionskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B9-16).....	111

Abb. 4.17	Standardisierte Rangregressionskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B17-B25).....	111
Abb. 4.18	Standardisierte Rangregressionskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B26-B33).....	112
Abb. 4.19	Rangkorrelationskoeffizienten als Sensitivitätsmaße der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Heißgasschichttemperatur im Kontrollvolumen 1 (siehe Abbildung 4.8) bezüglich der epistemischen Unsicherheiten (B9-16).....	112

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Durchführung des Auswahlprozesses - Methodenvergleich	7
Tab. 2.2	Verzweigungspunkte in einem brandspezifischen Ereignisablauf.....	9
Tab. 2.3	Endzustände im brandspezifischen Ereignisablauf.....	10
Tab. 2.4	Angaben zur Berechnung des brandspezifischen Ereignisablaufs	13
Tab. 2.5	Entdeckungswahrscheinlichkeiten für einen Brand.....	15
Tab. 2.6	Angaben zur Berechnung der Eintrittshäufigkeit eines Brandes im Raum.....	22
Tab. 3.1	Klassifikation brandbedingter Ausfälle	30
Tab. 3.2	Im Verfahren von Berry verwendete Parameter /BER 79/	37
Tab. 3.3	Brandeintrittshäufigkeiten auf der Grundlage der amerikanischen Betriebserfahrung (pro Anlagenbetriebsjahr während Leistungsbetrieb) ..	38
Tab. 3.4	Anlagenbetriebszustände zur Auswertung der französischen Betriebserfahrung bezüglich Brand	43
Tab. 3.5	Erfasste Brände pro Betriebszustand bei Instandhaltungsarbeiten (nach /IPS 00/)	43
Tab. 3.6	Kenngröße Brandentstehung - Anzahl der Brände im Zeitraum t und zugehörige Eintrittshäufigkeiten pro Jahr	44
Tab. 3.7	Definitionen, Bezeichnungen und Abkürzungen	61
Tab. 4.1	Aleatorische Größen und ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungen	80
Tab. 4.2	Wesentliche epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen	82
Tab. 4.3	Weitere epistemische Größen und ihre subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen	85
Tab. 4.4	Datenblatt zu den in der Referenzanlage verwendeten Kabelarten.....	89

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de