

**Methodenentwicklung
zur Analyse von
Personalhandlungen
im Rahmen
probabilistischer
Dynamikanalysen
am Beispiel von
Brandereignisabläufen
mit Brandbekämpfung**

Methodenentwicklung zur Analyse von Personalhandlungen im Rahmen probabilistischer Dynamikanalysen am Beispiel von Brandereignisabläufen mit Brandbekämpfung

Joerg Peschke
Burkhard Forell
Jürgen Hartung
Martina Kloos
Wolfgang Preischl
Marina Röwekamp

Juni 2014

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben RS1198 „Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) durchgeführt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH ausgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Deskriptoren

Brandanalysen, dynamischer Ereignisablauf, Personalhandlungen, PSA

Kurzfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens RS1198 „Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen“ wurde erstmals eine integrale deterministisch-probabilistische Sicherheitsanalyse (IDPSA) bzgl. eines Brandszenarios unter Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmaßnahmen durch das Anlagenpersonal erfolgreich unter Verwendung Analysewerkzeugs MCDET (**M**onte **C**arlo **D**ynamic **E**vent **T**ree) durchgeführt. Der menschliche Handlungsablauf zur Brandbekämpfung wurde dabei als eigener dynamischer Prozess modelliert, der mit dem Prozess der Brandentwicklung in Wechselwirkung steht. In der Analyse wurden verschiedene relevante stochastische Einflussfaktoren und Kenntnisstandunsicherheiten berücksichtigt.

Der Prozess der Brandentwicklung wurde mit dem CFD-Brandsimulationsprogramm ‘Fire Dynamics Simulator’ (FDS 6.0.1) berechnet. Der Prozess der menschlichen Handlungsabläufe im Rahmen der Brandbekämpfung wurde mit dem Crew-Modul von MCDET simuliert. Im Rahmen der probabilistischen Dynamikanalyse mit MCDET bzgl. des Brandszenarios wurden ca. 2400 verschiedene Brandsimulationen in Abhängigkeit aleatorischer und epistemischer Unsicherheiten durchgeführt.

Da die CFD-Brandsimulationen in Kombination mit der MCDET-Methode sehr rechenaufwändig sind, wurde für die erstmalige Anwendung ein überschaubares, relativ schnell verlaufendes Brandszenario in einem Brandraum mit relativ kleinem Volumen gewählt. Hierbei handelt es sich um ein hypothetisches Ölbrandszenario im Ölversorgungsraum der Zwangsumwälzpumpen einer Referenzanlage mit Siedewasserreaktor älterer Bauart. Es wurde versucht, das Brandszenario mit Anstieg der Pyrolyserate, dynamisch erfolgender Auslösung lokaler Rauchmelder, dynamisch erfolgendem Lüftungsabschluss durch Schließen einer Brandschutzklappe in der Abluft, Öffnen und Schließen von Brandschutztüren und Modellierung der Löschmaßnahmen möglichst realitätsnah umzusetzen.

Die umfangreichen Ergebnisse der probabilistischen Dynamikanalyse mit MCDET in Verbindung mit dem Rechencode FDS können für viele unterschiedliche Fragestellungen ausgewertet werden, z. B. welchen Einfluss verschiedene, durch das Anlagenpersonal durchgeführte Brandbekämpfungsmaßnahmen auf die Temperaturverteilung für eine ggf. geschädigte Komponente, das sogenannte Target, haben oder welchen Ein-

fluss die Wahl des Versagenskriteriums auf die Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Targets im Brandraum habt.

Aus der Vielzahl der unterschiedlichen Analysemöglichkeiten konnte im Rahmen dieser Arbeiten nur ein relativ kleiner Ausschnitt beispielhaft dargestellt werden. Durch die im Rahmen des Post-Processing durchgeführte Auswertung der Analyseergebnisse wurde z. B. demonstriert, in welchem Detail die Effekte des stochastischen Verhaltens technischer Einrichtungen und menschlicher Handlungsabläufe auf die Brandentwicklung quantifiziert werden können.

So konnte gezeigt werden, dass das auslegungsgemäße Schließen der Brandschutzklappe zwar keinen Einfluss auf die erreichten Maximalwerte der Raum- bzw. Kabeltemperaturen haben, wohl aber einen signifikanten Einfluss darauf, wie lange bestimmte kritische Temperaturen überschritten werden. Die Informationen zu den Zeitdauern, wie lange kritische Temperaturen überschritten werden, können dazu verwendet werden, Versagenskriterien von Targets, d. h. Komponenten, die durch einen Brand und seine Auswirkungen geschädigt werden, genauer zu spezifizieren. Der Einfluss verschieden definierter Versagenskriterien auf die Ergebnisse der Versagenswahrscheinlichkeit von Kabeln wurde an einem Anwendungsbeispiel demonstriert.

Des Weiteren wurden verschiedene Brandbekämpfungsmaßnahmen und deren Erfolgswahrscheinlichkeit sowie deren Einfluss auf die Raumtemperaturen und Temperaturen der inneren Kabelisolierung diskutiert. Dazu wurden die Zeitverteilungen für eine erfolgreiche Brandbekämpfung unter der Bedingung verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen durch das Anlagenpersonal ermittelt.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen sowohl die Notwendigkeit als auch den Vorteil, zeitabhängige Informationen in Sicherheitsanalysen einzubeziehen, um realistischere Abschätzungen von Versagenswahrscheinlichkeiten von Targets im Rahmen einer probabilistischen Brandanalyse durchführen zu können. Diese zeitabhängigen Informationen können über das Analysewerkzeug MCDET in Verbindung mit einem deterministischen Rechencode im Rahmen einer integralen deterministisch-probabilistischen Sicherheitsanalyse (IDPSA) ermittelt und für probabilistische Auswertungen verwendet werden.

Abstract

In the frame of the research and development project RS1198 sponsored by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) an integrated deterministic probabilistic safety analysis (IDPSA) of a fire scenario considering fire fighting by the plant personnel has successfully performed applying the tool MCDET (**M**onte **C**arlo **D**ynamic **E**vent **T**ree). The sequence of human actions was modelled as a separate dynamic process which interacts with fire development. In the analysis several relevant aleatory as well as epistemic uncertainties have been taken into account.

The fire development has been simulated through the CFD fire simulation code 'Fire Dynamics Simulator' (FDS 6.0.1). The time dependent sequence of fire fighting has been modelled by means of the Crew module of MCDET. In the probabilistic dynamics analysis with MCDET approx. 2400 different fire simulation runs have been performed depending on aleatory and epistemic uncertainties.

The combination of CFD fire simulations and the MCDET method is very challenging with regard to the computational processing power. Hence, for the first application a fast developing fire scenario in a relatively small fire compartment has been selected in order to ensure the tasks being manageable. Therefore, an oil pool fire in the room for the oil supply of the circulating pump of a German boiling water reactor reference plant designed to earlier standards has been selected as basic scenario to be analysed. The scenario has been modelled in as far as possible realistic manner considering an increasing pyrolysis rate, the dynamics in the actuation of automatically actuated smoke detectors installed in the fire compartment and the closure of a fire damper in the air outlet duct as well as the opening and closure of fire doors.

The extensive results of the probabilistic dynamics analysis with MCDET in combination with the FDS code can be analysed with respect to a variety of different issues to be addressed, e. g., for analysing the effects of different fire fighting actions of the plant personnel on the temperature distribution of the target or the consequences of defining failure criteria on the distribution of the failure probabilities of a given target in the fire compartment.

Only a relatively small part of the analytical options has so far been used for demonstrating the wider application spectrum of the approach. It has been demonstrated in which detail effects of stochastic influences regarding technical features and human

actions on the fire development can be quantified by means of post-processing the results of the FDS/MCDET analysis.

It has been shown that the closure of the fire damper has no significant effect on the maximum room or cable temperatures. However, it there is a significant effect on the duration of critical temperatures being exceeded. This information can be used for defining failure criteria of targets more exactly. The influence of different failure criteria on the failure probability of the cable target has been demonstrated in an application example.

The effects of different fire suppression means on the room temperatures and on the temperatures of the inner cable jacket of the cable target as well as their success probabilities have been discussed. For that reason, time distributions of the time of the fire being successfully extinguished depending on the different fire fighting means by plant personnel have been calculated.

The results of the analyses show the need for and the benefit of including time dependent information in probabilistic fire safety analysis, which might result in a more realistic assessment of failure probabilities of targets in the fire compartment. The time dependent information can be achieved by an integrated deterministic-probabilistic safety analysis (IDPSA) using the MCDET tool in combination with a deterministic code and is applicable within probabilistic analyses.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Modell der Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal	5
2.1	Annahmen der Modellierung	6
2.2	Modell zur Brandbekämpfung und Spezifikation der berücksichtigten Unsicherheiten.....	7
2.2.1	Aleatorische und epistemische Unsicherheiten des Brandbekämpfungsmodells	8
2.2.2	Abhängigkeiten von Handlungsabläufen vom Prozess der Brandentwicklung und damit verbundener Dynamik-Stochastik-Wechselwirkungen.....	19
2.3	Beschreibung der im Handlungsmodell berücksichtigten Handlungsabläufe.....	25
2.3.1	Handlungsablauf bei auslegungsgemäßer Funktion der Brandmeldeanlage.....	29
2.3.2	Brandmeldeanlage defekt	62
3	Modell zur Branddynamik	81
3.1	Beschreibung des Brandszenarios	81
3.1.1	Raumauswahl und Szenario	81
3.1.2	Modellierung des Brandszenarios in FDS	88
3.2	Aleatorische und epistemische Unsicherheiten bzgl. des Modells zur Branddynamik.....	89
4	MCDET/FDS-Analyse	95
4.1	Methodik zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Brandbekämpfung und Brandentwicklung.....	95
4.2	Ablaufschema zur Erzeugung eines Dynamischen Ereignisbaumes (DET- Dynamic Event Tree).....	101
4.3	Ergebnisse.....	106

5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	137
	Literaturverzeichnis.....	145
	Abbildungsverzeichnis.....	149
	Tabellenverzeichnis.....	151
	Abkürzungen.....	155
A	Anhang: Beschreibung der Handlungsabläufe für den Fall, dass nur ein Brandmelder einen Alarm auslöst	157

1 Einführung

Brände in einem Kernkraftwerk können zu Beeinträchtigungen und Ausfällen sicherheitsrelevanter baulicher Anlagenteile, Systeme und Komponenten (englisch: structures, systems and components, SSC) führen. Das Ausmaß der Schädigung hängt zu einem wesentlichen Teil von der gegebenen Brandlast und den Ventilationsbedingungen im betreffenden Brandraum ab, aber auch von der benötigten Zeitdauer, bis der Brand bekämpft und letztlich erfolgreich gelöscht werden kann.

Unter normalen Bedingungen kann ein Brand durch die in Räumen bzw. ganzen Raumbereichen eines Kernkraftwerks fest installierten Sprühwasserlöschanlagen relativ schnell gelöscht werden, da die Brandbekämpfung mehr oder minder direkt durch die Löschanlage erfolgt, sobald ein Entstehungsbrand mittels automatischer Brandmeldedetektoren detektiert und gemeldet worden ist. In diesem Falle wird entweder die Löschanlage direkt automatisch durch die Brandmeldeanlage ausgelöst oder deren Auslösung erfolgt aufgrund der Brandmeldung manuell fernausgelöst. Falls die automatische Auslösung nicht auslegungsgemäß funktioniert, hängt die Brandbekämpfung überwiegend von Maßnahmen des betreffenden Anlagenpersonals und den zur Verfügung stehenden Brandbekämpfungseinrichtungen ab.

Nach einer Brandentstehung ist die weitere Brandentwicklung ein dynamischer Prozess, der durch eine Vielzahl verschiedener Faktoren beeinflusst werden kann. Neben den stochastischen Einflussfaktoren stellen die menschlichen Handlungen zur Brandbekämpfung einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Brandentwicklung dar. Dabei beschreiben die menschlichen Handlungsabläufe der Brandbekämpfung einen eigenständigen dynamischen Prozess, der mit dem Prozess der Brandentwicklung komplexen Wechselwirkungen, zeitlichen Abhängigkeiten und stochastischen Einflüssen unterworfen ist. Mit den bisher angewendeten konventionellen Methoden der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), d. h. Fehler- und Ereignisbaumanalyse, können solche komplexen Wechselwirkungsprozesse nicht adäquat modelliert und analysiert werden. Personalhandlungen im Verlauf eines Brandereignisses, insbesondere zur Brandbekämpfung, wurden bisher in deutschen Brand-PSA, aber auch in ausländischen probabilistischen Untersuchungen, nur mit groben Ansätzen in das PSA-Modell eingebunden.

Ein Ziel der im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Vorhabens RS1198 durchgeführten Arbeiten besteht deshalb da-

rin, die menschlichen Handlungen, die zur erfolgreichen Bekämpfung eines Brand durchgeführt werden, so zu modellieren, dass

- die Zusammenarbeit und Kommunikation des beteiligten Personals bei der Brandbekämpfung,
- zufällige Schwankungen der Reaktions- und Handlungszeiten bei der Ausführung einzelner Handlungen sowie
- die Einbindung stochastischer Einflussgrößen, die sich auf die Ausführung der Brandbekämpfung auswirken können,

im Rahmen eines dynamischen Prozesses berücksichtigt werden können.

Das Ziel dieses Arbeitspunktes besteht deshalb in der Anwendung einer integralen deterministisch-probabilistischen Sicherheitsanalyse (englisch: **integrated deterministic probabilistic safety analysis, IDPSA**), die eine möglichst realitätsnahe Modellierung der komplexen Wechselwirkungen und zeitlichen Abhängigkeiten zwischen

- dem komplexen physikalisch-chemischen Prozess der Brandentwicklung,
- den im Verlauf des Brandereignisses stattfindenden menschlichen Handlungsabläufen zur Bekämpfung des Brandes und
- den für die Brandentwicklung und Brandbekämpfung relevanten stochastischen Einflussfaktoren

erlaubt.

Die IDPSA ist eine innovative Methodik, mit der eine realistischere und detaillierte Analyse eines Brandszenarios ermöglicht wird und mit der die Auswirkungen stochastischer Einflussgrößen sowohl auf die Brandentwicklung als auch auf die menschlichen Handlungsabläufe quantifiziert werden können.

Zur Durchführung einer IDPSA wird das in der GRS entwickelte Analysewerkzeug **MCDET (Monte Carlo Dynamic Event Tree) /HOF 01/** in Verbindung mit dem Crew-Modul **/PES 06/** verwendet. Mit dem Crew-Modul lassen sich menschliche Handlungsabläufe unter Berücksichtigung stochastischer Einflussgrößen als dynamischer Prozess simulieren und analysieren.

Zur Simulation der Zustände im Brandraum wird ein komplexes Brandsimulationsmodell, der CFD (**computational fluid dynamics**)-Code FDS (**Fire Dynamics Simulator**) in seiner aktuellen Version FDS 6.0.1 eingesetzt. Durch die Kopplung des Analysewerkzeugs MCDET mit dem FDS-Code können sowohl epistemische Unsicherheiten (d. h. Kenntnisstandunsicherheiten) als auch stochastische Einflüsse (aleatorische Unsicherheiten), im Rahmen der Simulationsrechnungen berücksichtigt werden.

FDS erlaubt eine realitätsnahe Simulation von Raumbränden unter kernkraftwerkspezifischen Bedingungen. Das Modell berücksichtigt die Sauerstoffbilanz der Verbrennung und die vorwiegend mechanische Ventilation (Zwangsbelüftung) des Brandraums, die sich durch Öffnungs- und Schließvorgänge von Raumtüren oder Brandschutzklappen dynamisch verändert. Ferner wird die Raumkubatur mit den relevanten Einbauten, Ventilationskanälen und den im Raum angeordneten Brandmeldedetektoren (Rauchmeldern) realitätsnah abgebildet. Die Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate ist sowohl von der vom Anwender zu definierenden Freisetzungsrate des Brandguts abhängig als auch davon, ob für die Verbrennung genügend Sauerstoff im Brandraum vorhanden ist. Als sogenanntes Target, also eine Funktion einer Komponente, die brandbedingt unzulässig beeinträchtigt werden könnte, wurde die Funktion von Kabeln der Elektro- und Leittechnik betrachtet, die brandbedingt gestört sein kann.

Das Modell der Brandrandbekämpfung basiert auf der im Betriebshandbuch (BHB) der Referenzanlage festgelegten Brandschutzordnung und auf Interviews, welche mit Vertretern der ausgewählten Referenzanlage durchgeführt wurden.

Ein Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bestand darin, die Handlungsmaßnahmen der Brandbekämpfung durch das Analgenpersonal als dynamischen Prozess zu modellieren und zu simulieren. Des Weiteren wurde berücksichtigt, dass der Prozess der Brandbekämpfung in unmittelbarer zeitlicher Wechselwirkung mit dem Prozess der Brandentwicklung steht, d. h., der jeweilige Zustand der Brandentwicklung hat Einfluss auf die Brandbekämpfung und auf Handlungen, die im Rahmen der Brandbekämpfung durchgeführt werden. Diese Wechselwirkungen können im Zusammenspiel mit auftretenden stochastischen Ereignissen mehr oder weniger großen Einfluss auf die Brandentwicklung haben.

Relevante Unsicherheiten (aleatorische wie epistemische) wurden bzgl. der jeweiligen Prozesse – Brandentwicklung bzw. Brandbekämpfung – spezifiziert und in der Analyse berücksichtigt. Die MCDET-Analyse wurde nach einem Verfahren durchgeführt, dass

eine nachträgliche Durchführung einer approximativen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse erlaubt /PES 10/.

In Abschnitt 2 wird das Modell der Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal im Detail beschrieben. Dabei werden die Annahmen der Modellierung, die für den Handlungsablauf berücksichtigten stochastischen Einflussgrößen (aleatorische Unsicherheiten) sowie auftretende Abhängigkeiten der Handlungsabläufe vom Prozess der Brandentwicklung beschrieben. Des Weiteren werden die Handlungsabläufe, die über das Crew-Modul simuliert werden, im Detail sowohl für diejenigen Fälle beschrieben, wo die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert oder wo dies nicht der Fall ist.

In Abschnitt 3 wird das Modell zur Branddynamik beschrieben, wobei auf die Raumauswahl und die Modellierung des Brandszenarios sowie auf die berücksichtigten aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten bzgl. der Branddynamik eingegangen wird.

Abschnitt 4 behandelt die Durchführung der MCDET/FDS-Analyse. Ergebnisse der Analyse werden in Abschnitt 4.3 dargestellt.

Eine Zusammenfassung und Schlussfolgerungen bzgl. der durchgeführten Arbeiten werden in Abschnitt 5 gegeben.

2 Modell der Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal

In diesem Abschnitt wird das Modell zur Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal beschrieben. Die Besonderheit und Innovation der Modellierung besteht darin, dass die Handlungsabläufe des Anlagenpersonals zur Brandbekämpfung als dynamischer Prozess modelliert werden. Der dynamische Prozess der Handlungsabläufe kann dabei durch verschiedene stochastische Einflussgrößen (aleatorische Unsicherheiten) beeinflusst werden.

Die für die Analyse der Brandbekämpfung relevanten technischen Komponenten betreffen die Brandmeldeanlage und die damit verbundenen im Brandraum installierten acht Brandmelder, die im Raum installierte Sprühwasserlöschanlage (FLA) sowie die Löschausrüstung der Feuerwehr. Auf weitere technische Details bzgl. des Brandraumes wird in Abschnitt 3.1.1 eingegangen.

Für das Brandszenario wurde ein Ölbrand in dem relativ kleinen Ölversorgungsraum ausgewählt. Der Ölbrand entwickelt sich im Vergleich z. B. zu einem Kabelbrandszenario, relativ schnell, so dass eine Simulationszeit bis zu einer halben Stunde nach Brandentstehung bis zum Erreichen von Endzuständen als ausreichend betrachtet wird. Deshalb wurden sowohl für die Simulationen Brandbekämpfungsmaßnahmen als auch für die Brandsimulationen eine Simulationszeit von 1800 s (30 Minuten) zugrunde gelegt.

Die Analyseergebnisse der Brandbekämpfung werden durch das Crew-Modul /PES 06/ erzeugt, mit dem die modellierten dynamischen Handlungsabläufe simuliert werden können. Durch Post-Processing-Analysen der durch das Crew-Modul erzeugten Ergebnisse erfolgt die Quantifizierung der Auswirkungen der berücksichtigten stochastischen Einflussgrößen auf den Handlungsablauf.

Zunächst werden in Abschnitt 2.1 die Annahmen beschrieben, die zur Modellierung der Brandbekämpfung vorausgesetzt werden.

In Abschnitt 2.2 werden die im Modell berücksichtigten stochastischen Einflussgrößen (aleatorische Unsicherheiten), epistemische Unsicherheiten sowie die in der Analyse berücksichtigten Wechselwirkungen zwischen Handlungsabläufen und dem Prozess der Brandentwicklung beschrieben.

Die modellierten Handlungsabläufe der Brandbekämpfung, die durch das Crew-Modul simuliert werden, werden in Abschnitt 2.3 für die folgenden beiden Fälle beschrieben,

- zum einen, wenn die Brandmeldeanlage bei Eintreten eines Entstehungsbrandes auslegungsgemäß funktioniert und mindestens zwei automatische Brandmelder im Brandraum einen Alarm auslösen (siehe Abschnitt 2.3.1) und
- zum anderen, wenn die Brandmeldeanlage nicht anforderungsgemäß funktioniert (als Ausfall bezeichnet) und bei Eintreten eines Entstehungsbrandes kein Alarm ausgelöst wird (Abschnitt 2.3.2).

Der hypothetische Fall, dass bei Eintritt eines Brandes nur genau ein Brandmelder einen Alarm signalisiert, was einen anderen Handlungsablauf zur Folge hat, wird der Vollständigkeit halber im Anhang 1 beschrieben. Dieser hypothetische Fall, der nach Expertenmeinung auf Grund der acht in dem für die Analysen ausgewählten Brandraum der Referenzanlage installierten Melder nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eintritt ($1,0 \text{ E-}05$ pro Anforderung), wird nur im Rahmen der Analyse der Brandbekämpfungsmaßnahmen berücksichtigt. In Verbindung mit den Brandsimulationsrechnungen mit dem Brandsimulationscode FDS wird dieser Fall wegen seiner geringen Eintrittswahrscheinlichkeit und aus Gründen der Rechenzeiterparnis nicht berücksichtigt.

Einige Analyseergebnisse bzgl. der Brandbekämpfungsmaßnahmen unter Berücksichtigung aleatorischer Unsicherheiten werden in Abschnitt 4.3 dargestellt und diskutiert.

2.1 Annahmen der Modellierung

Bei der Modellierung der Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

1. Es wird angenommen, dass ein Brand im betreffenden Raum vorliegt. D. h. Alar-me, die durch Störsignale der Brandmeldeanlage (BMA) ausgelöst werden und bei denen kein Brand vorliegt (sogenannte Falschalar-me), werden in dieser Analyse nicht berücksichtigt, da diese Aktionen keinen Einfluss auf den Brand haben.
2. Die Analyse erfolgt unter der Bedingung, dass bei der Entstehung eines Brandes in dem ausgewählten Raum die automatische Auslösung der stationären Sprühwasserlöschanlage (Feuerlöschanlage, FLA), die im Raum installiert ist, nicht erfolgt.

Allerdings wird angenommen, dass die FLA mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vor Ort manuell durch das Anlagenpersonal ausgelöst werden kann.

3. Wenn das Anlagenpersonal am betreffenden Brandraum eintrifft und nach Erkennen des Brandes die Bekämpfung des Brandes (erfolgreich) beginnen kann – sei es durch die Sprühwasserlöschanlage, mittels Handfeuerlöschern oder durch die Einsatzmittel der Feuerwehr, dann wird der Handlungsablauf der Brandbekämpfung als beendet betrachtet. Zeitdauer und Effekt einer Löschung werden im Rahmen der Brandsimulation durch den Brandsimulationscode FDS berücksichtigt. Wenn im Rahmen der Brandsimulation eine Löschung stattfindet und die Kabelmantelinnentemperatur den Wert von 120 °C unterschreitet, wird die Löschung als erfolgreich betrachtet und die Simulation wird beendet (Abbruchkriterium).

Durch die in 1. und 2. beschriebenen Annahmen, d. h. der Brand entsteht im Raum und die Sprühwasserlöschanlage im Raum wird nicht automatisch ausgelöst, sind die in der Analyse ausgewiesenen Wahrscheinlichkeiten als bedingte Wahrscheinlichkeiten zu betrachten. Zur Ermittlung der unbedingten Wahrscheinlichkeiten sind die bedingten Wahrscheinlichkeiten, die sich aus der Analyse ergeben, mit der Eintrittswahrscheinlichkeit, dass ein Brand im Raum entsteht und mit der Wahrscheinlichkeit, dass die Sprühwasserlöschanlage im Raum nicht automatisch ausgelöst wird, zu multiplizieren. Für die in der Anlage installierte motorbetriebene Fernschaltarmatur der Sprühwasserlöschanlage beträgt die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit bei Fernauslösung z. B. $p_f = 2,8 \text{ E-}03$ pro Anforderung /FOR 14/.

2.2 Modell zur Brandbekämpfung und Spezifikation der berücksichtigten Unsicherheiten

Das Modell der Brandbekämpfung basiert auf der Brandschutzordnung der ausgewählten Referenzanlage. Das Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten besteht darin, die Brandbekämpfung in Abhängigkeit vom Zustand der Brandentwicklung als dynamischen Prozess zu modellieren und zu simulieren. Der Prozess der Brandbekämpfung steht dabei in unmittelbarer zeitlicher Wechselwirkung mit dem Prozess der Brandentwicklung. D. h., der Zustand der Brandentwicklung hat Einfluss auf die Brandbekämpfung, Handlungen im Rahmen der Brandbekämpfung können mehr oder weniger große Auswirkung auf die Brandentwicklung haben. Des Weiteren treten in der Modellierung beider Prozesse sowohl epistemische als auch aleatorische Unsicherheiten auf.

In dem entwickelten Modell zur Brandbekämpfung wird folgendes Anlagenpersonal berücksichtigt:

- Schichtleiter (SL), der die Brandbekämpfung von der Warte aus koordiniert,
- Brandläufer (BL), der auf Anforderung vom Schichtleiter zum betreffenden Brandraum geht, um die Situation vor Ort einzuschätzen,
- Einsatzleiter der Werkfeuerwehr (ELFW),
- Rundgänger (RG), der während seiner Rundgänge zu einem zufälligen Zeitpunkt zum betreffenden Brandraum kommt, in welchem er den entstandenen Brand entdecken kann, insbesondere dann, wenn vorher noch kein Brandalarm ausgelöst wurde. Der Rundgänger wird zum Brandläufer, wenn der Rundgänger vom Schichtleiter angewiesen wird, sich zum betreffenden Brandraum zu begeben, um die Situation zu ermitteln. Die Anweisung des Schichtleiters kann nur dann erfolgen, wenn der SL durch die Brandmeldeanlage (BMA) alarmiert wurde.
- Löschgruppe bzw. Feuerwehr (LG). Obwohl die Löschgruppe aus mehreren Personen besteht, wird sie der Einfachheit halber in diesem Modell als eine Einheit betrachtet, die geschlossen agiert.

Im folgenden Abschnitt 2.2.1 werden die alternativen Situationen beschrieben, die sich durch Zufallseinflüsse ergeben können (aleatorische Unsicherheiten) und die in der Simulation des Brandbekämpfungsmodells berücksichtigt werden. Außerdem werden in Abschnitt 2.2.2 diejenigen Stellen diskutiert, bei denen der weitere Handlungsablauf vom Zustand der Brandentwicklung abhängt. In den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 werden die Handlungsabläufe zur Brandbekämpfung in Abhängigkeit von den Brandmeldesituationen der Fälle 1 (BMA funktioniert auslegungsgemäß) und 2 (Ausfall der BMA) im Detail beschrieben.

2.2.1 Aleatorische und epistemische Unsicherheiten des Brandbekämpfungsmodells

In diesem Abschnitt werden die im Modell berücksichtigten stochastischen Einflussgrößen (aleatorische Unsicherheiten) beschrieben, die den Handlungsablauf der Brandbekämpfung beeinflussen können. Obwohl für die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten auch epistemische Unsicherheiten spezifiziert wurden, sind in der Simulation des Handlungsablaufs nur die aleatorischen Unsicherheiten berücksichtigt worden. Für die

epistemischen Unsicherheiten wurden ihre jeweiligen Referenzwerte verwendet. Diese Vorgehensweise wurde zunächst gewählt, da im Wesentlichen die Einflüsse der aleatorischen Unsicherheiten zu den Zeitverteilungen beitragen, die in die Brandsimulationen eingehen.

Folgende aleatorische Unsicherheiten wurden in dem Modell der Brandbekämpfung berücksichtigt:

Situation der Brandmeldung

Die erste stochastische Situation, bei der es zu unterschiedlichen Handlungsabläufen kommt, besteht in den alternativen Situationen der Brandmeldung, durch die der Brand in der Warte gemeldet wird. Die unterschiedlichen Brandmeldesituationen drücken sich durch die Anzahl der Brandmelder aus, die bei Vorliegen eines Entstehungsbrandes eine Brandmeldung in der Warte auslösen. Bzgl. der Auslösung der Brandmelder wird zwischen folgenden drei Situationen unterschieden, die jeweils unterschiedliche Handlungsabläufe zu Folge haben:

- **ALId = 1:** Die Brandmeldeanlage funktioniert auslegungsgemäß, wenn in der Warte eine Brandmeldung von mindestens zwei Brandmeldern in dem betreffenden Raum bzw. Raumbereich innerhalb kurzer Zeit eingeht. In diesem Fall werden die Maßnahmen zur Brandbekämpfung eingeleitet, sobald ein Alarm der ersten beiden Melder aus dem Raum erfolgt ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Brandmeldeanlage im Anforderungsfall intakt ist, wird unter Verwendung von Daten aus der Betriebserfahrung mit dem Referenzwert 0,995 abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit p_{AL1} der Eintrittswahrscheinlichkeit, dass die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert, kann in Abhängigkeit der Unsicherheiten p_{AL2} und p_{AL3} für die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Alternativen ALId = 2 und ALId = 3 hergeleitet werden durch:

$$p_{AL1} = 1 - p_{AL2} - p_{AL3} \quad (2.1)$$

- **ALId = 2:** Die automatische Brandmeldung im Brandraum und den benachbarten Räumen ist vollständig ausgefallen. Der Ausfall der Brandmeldeanlage wird mit der Wahrscheinlichkeit von 4,95 E-03 pro Anforderung als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit p_{AL2} der Eintrittswahrscheinlichkeit für den Ausfall der Brandmeldung wird durch einer Beta-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 1,5$ und 301,5 ausgedrückt, deren Erwartungswert dem verwendeten Referenzwert 4,95 E-03 entspricht, d. h. $p_{AL2} = \text{Beta}(1,5;301,5)$.

- **ALId = 3:** Der Schichtleiter in der Warte erhält die Meldung von nur einem Brandmelder. Dieser Fall ist aus der Betriebserfahrung bekannt, wenn auf Grund des Brandverlaufs (z. B. lokales Verschmoren elektrischer Komponenten) nur sehr geringe Mengen Rauch freigesetzt werden. In diesem Fall ist der Brandverlauf jedoch nicht kritisch und nicht vergleichbar mit dem in dieser Analyse zu untersuchenden Brandszenario. Des Weiteren kann dieser Fall eintreten, wenn bis auf einen Rauchmelder die übrigen Melder im Brandraum nicht melden können bzw. die Signale der restlichen Melder nicht auf der Warte angezeigt werden. Für diesen Fall liegen keine Wahrscheinlichkeiten aus der Betriebserfahrung vor. Durch Expertenurteil wird er jedoch als wenig wahrscheinlich angenommen, und die Eintrittswahrscheinlichkeit für diesen mehr hypothetischen Fall wird mit einem Referenzwert von 5,0 E-05 abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Alarmierungssituation wird durch die Verteilung p_{AL3} ausgedrückt.
- p_{AL3} folgt einer Verteilung die sich durch $p_{AL3} = (1 - p_{AL2}) \cdot p'_{AL3}$ herleiten lässt, wobei p'_{AL3} die bedingte Verteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit unter der Bedingung darstellt, dass die Alarmsituation ALId = 2 nicht eingetreten ist. Da $(1 - p_{AL2})$ Werte aufweist, die sämtlich nahe bei 1 liegen, gilt näherungsweise $p_{AL3} \approx p'_{AL3}$. Da hier die bedingte Verteilung p'_{AL3} ungefähr der unbedingten Verteilung p_{AL3} entspricht, wird p_{AL3} als Beta-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 0,5$ und $\beta = 49999,5$ geschätzt, deren Erwartungswert dem Referenzwert 5,0 E-05 entspricht, d. h. $p_{AL3} = \text{Beta}(0,5;9999,5)$.

Erreichbarkeit des Personals über Funkmelder ('Piepser')

Bei dem Versuch, den entsprechenden Brandläufer (BL) oder den Einsatzleiter der Feuerwehr (ELFW) über einen Funkmelder (Piepser) zu erreichen, können zufallsbedingt verschiedene Situationen eintreten, die durch die Variable 'bRelFM' beschrieben werden:

- **bRelFM = 1:** Der Funkmelder bzw. Piepser funktioniert und der BL bzw. der ELFW kann den Piepser sofort hören, wobei er die entsprechende Information vom Display ablesen und ohne große Zeitverzögerung entsprechend reagieren kann. Für diese Situation wird eine Wahrscheinlichkeit von 0,89 als Referenzwert angenommen. Die epistemische Unsicherheit p_{FM1} der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation kann in Abhängigkeit der Unsicherheiten p_{FM2} und p_{FM3} der Alternativen bRelFM = 2 und bRelFM = 3 ermittelt werden durch:

$$p_{FM1} = 1 - p_{FM2} - p_{FM3} \quad (2.2)$$

- **bRelFM = 2:** Der BL befindet sich gerade in einem Funkloch. oder es herrscht in seiner unmittelbaren Nähe so viel Lärm, dass der BL den Piepser nicht unmittelbar hören kann. Des Weiteren kann sich der BL in der Pause befinden, oder es herrscht gerade Schichtwechsel. Alle Faktoren wirken sich auf die Zeitdauer aus, in der der BL den Piepser wahrnimmt und entsprechend reagieren kann. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich der BL in einer Situation befindet, in der er den Piepser erst mit einer mehr oder weniger großen Zeitverzögerung wahrnehmen kann, wird mit dem Referenzwert von 0,1 abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation wird durch die Verteilung p_{FM2} ausgedrückt. p_{FM2} folgt einer Beta-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 1,5$ und $\beta = 13,5$ und dem Erwartungswert 0,1, d. h. $p_{RelFM2} = \text{Beta}(1,5;13,5)$.
- **bRelFM = 3:** Es kann vorkommen, dass der BL den Piepser vergessen hat, die Batterien des Piepsers leer sind oder der Piepser defekt ist. Das sind diejenigen Situationen, in denen der BL über den Funkmelder nicht erreichbar ist. Für diese Situation wird eine Wahrscheinlichkeit von 0,01 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation wird durch die Verteilung p_{FM3} ausgedrückt. p_{FM3} folgt einer Verteilung, die sich herleiten lässt durch:

$$p_{FM3} = (1 - p_{FM2}) \cdot p'_{FM3}, \quad (2.3)$$

wobei p'_{FM3} die bedingte Verteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit der Situation $bRelFM = 3$ unter der Bedingung darstellt, dass die Situation $bRelFM = 2$ nicht eingetreten ist. Wenn für p_{FM3} eine Beta-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 0,5$ und $\beta = 49,5$ mit dem Erwartungswert 0,01 abgeschätzt wird, kann durch Simulationsrechnungen aus der Beziehung $p_{FM3} = (1 - p_{FM2}) \cdot p'_{FM3}$ und einer Beta-Verteilung für p'_{FM3} mit den Parametern $\alpha = 0,5$ und $\beta = 44,5$ und mit dem Erwartungswert 0,011 approximiert werden.

Aufenthaltort des Brandläufers, wenn er Anweisung vom Schichtleiter erhält

Der Brandraum befindet sich innerhalb des Kontrollbereichs der Anlage. Nach anlagenspezifischen Informationen wird derjenige Brandläufer angewiesen, der sich nach Einschätzung vom SL in der Nähe des Brandraums befindet. Dies kann zufällig jemand sein, der sich innerhalb des Kontrollbereichs befindet. Es kann sich aber auch die Situation ergeben, dass der SL einen Brandläufer außerhalb des Kontrollbereichs anfunkelt, da sich dieser nach Meinung des SL näher am Brandraum befindet. Die alternativen Situationen werden durch die Variable 'bKtrBer' ausgedrückt:

- **bKtrBer = 1:** Der BL befindet sich innerhalb des Kontrollbereichs, wenn er vom SL die Anweisung erhält, sich zum betreffenden Brandraum zu begeben. Solange diesbezüglich keine detaillierteren anlagenspezifischen Informationen vorliegen, wird als Wahrscheinlichkeit ein Referenzwert von 0,5 angenommen. Die epistemische Unsicherheit bzgl. der Wahrscheinlichkeit, dass sich der BL innerhalb des Kontrollbereichs befindet, wird durch die Verteilung p_{KtrBer1} ausgedrückt. Es wird angenommen, dass p_{KtrBer1} einer Gleichverteilung zwischen 0,3 und 0,7 folgt, d. h. $p_{\text{KtrBer1}} = U(0,3;0,7)$.
- **bKtrBer = 2:** BL befindet sich außerhalb des Kontrollbereichs, wenn er vom SL die Anweisung erhält, sich zum betreffenden Brandraum zu begeben. Für die Wahrscheinlichkeit dieser Situation wird 0,5 als Referenzwert angenommen. Die epistemische Unsicherheit p_{KtrBer2} bzgl. der Wahrscheinlichkeit, dass sich der BL außerhalb des Kontrollbereichs befindet, kann in Abhängigkeit der Unsicherheiten p_{KtrBer1} für die Alternative $b\text{KtrBer} = 1$ ermittelt werden durch:

$$p_{\text{KtrBer2}} = 1 - p_{\text{KtrBer1}} \quad (2.4)$$

Brandläufer begibt sich zum Brandraum

Wenn der BL vom Schichtleiter angewiesen wird, sich zum betreffenden Brandraum zu begeben, können zufallsbedingt die Situationen eintreten, dass der BL zu einem falschen Raum geht oder im Extremfall den Raum nicht in angemessener Zeit erreichen kann. Beide Situationen führen zu Handlungsabläufen, die sich von dem unterscheiden, bei welchem sich der BL sofort zum richtigen Brandraum begibt. Die alternativen Situationen, die sich zufällig ergeben können, werden durch die Variable $b\text{BLerrRm}$ beschrieben:

- **bBLerrRm = 1:** Nach der Anweisung durch den SL begibt sich der BL zum richtigen Raum, in welchem der Brand ausgebrochen ist. Die Wahrscheinlichkeit für diese Situation wird mit 0,997 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit p_{BLerrRm1} der Wahrscheinlichkeit, dass der BL den richtigen Raum erreicht, kann in Abhängigkeit der Unsicherheiten p_{BLerrRm2} und p_{BLerrRm3} für die Alternativen $b\text{BLerrRm} = 2$ und $b\text{BLerrRm} = 3$ ermittelt werden durch:

$$p_{\text{BLerrRm1}} = 1 - p_{\text{BLerrRm2}} - p_{\text{BLerrRm3}} \quad (2.5)$$

- **bBLerrRm = 2:** Der BL ist zu einem falschen Raum gegangen. Der Fehler kann entweder beim SL liegen, der irrtümlich einen falschen Raum genannt hat (THERP 20-8 (1): $p = 0.001$), oder der BL hat die Raumbezeichnung falsch verstanden bzw. verwechselt (THERP 20-8 (1): $p = 0,001$). Aus den über THERP (Technique for

Human Error Rate Prediction) /SWA 83/ ermittelten Werten wird für die Situation, dass der BL irrtümlich zu einem falschen Raum geht, eine Wahrscheinlichkeit von 0,002 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit für die Eintrittswahrscheinlichkeit wird durch die Verteilung $p_{BLerrRm2}$ ausgedrückt. $p_{BLerrRm2}$ folgt einer Beta-Verteilung (0,5;249,5, d. h. $p_{BLerrRm2} = \text{Beta}(0,5;249,5)$).

- **$bBLerrRm = 3$** : Im Extremfall kann die Situation eintreten, dass es dem BL nicht möglich ist, den Brandraum in einer für die Brandbekämpfung angemessener Zeit zu erreichen. Diese Situation kann z. B. eintreten, wenn sich der BL auf dem Weg zum Brandraum so stark verletzt, dass er den Brandraum nicht vor der Löschgruppe erreichen kann. In diesem Fall werden keine Recovery-Aktionen (d. h. nachträgliche Aktionen zur Behebung des Fehlers) bzgl. des BL modelliert, da sich die Löschgruppe, die parallel zum BL alarmiert wurde, bereits auf dem Weg zum Brandraum befindet und angenommen wird, dass die LG auf jeden Fall den Brandraum vor dem BL erreichen wird. Die Wahrscheinlichkeit, dass der BL den Raum nicht erreicht, wird mit 0,001 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit für die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation wird durch die Verteilung $p_{BLerrRm3}$ ausgedrückt. $p_{BLerrRm3}$ folgt einer Verteilung die sich herleiten lässt durch:

$$p_{BLerrRm3} = (1 - p_{BLerrRm2}) \cdot p'_{BLerrRm3} \quad (2.6)$$

Die Verteilung $p'_{BLerrRm3}$ beschreibt die bedingte Verteilung der Wahrscheinlichkeit unter der Bedingung, dass das Ereignis $bBLerrRm = 2$ nicht eingetreten ist. Da $(1 - p_{BLerrRm2})$ Werte aufweist, die sämtlich nahe bei 1 liegen, gilt näherungsweise $p_{BLerrRm3} \approx p'_{BLerrRm3}$. Da hier die bedingte Verteilung $p'_{BLerrRm3}$ nahezu gleich der unbedingten Verteilung $p_{BLerrRm3}$ ist, wird $p_{BLerrRm3}$ als Beta-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 0,5$ und $\beta = 499,5$ geschätzt, deren Erwartungswert dem Referenzwert $5 \cdot 10^{-5}$ entspricht, d. h. $p_{BLerrRm3} = \text{Beta}(0,5;499,5)$.

Einsatzleiter der Werkfeuerwehr (ELFW) begibt sich nach Alarmierung durch den Schichtleiter zum Kontrollbereich

Wenn der Einsatzleiter der Werkfeuerwehr (ELFW) vom Schichtleiter (SL) über den Brandalarm informiert wurde, begibt sich der ELFW von seinem aktuellen Standort zum Eingang des Kontrollbereichs im betreffenden Anlagenblock. Da die den Analysen zugrunde gelegte Referenzanlage zwei Blöcke hat, können dabei zufallsbedingt folgende alternative Situationen eintreten, die durch die Variable 'bELBlk' beschrieben werden:

- **bELBlk = 1:** Der ELFW begibt sich zum Eingang des Kontrollbereichs im richtigen Block. Die Wahrscheinlichkeit dafür wird mit 0,999 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit der Wahrscheinlichkeit, dass sich der ELFW zum Kontrollbereich im richtigen Block begibt, wird durch die Verteilung p_{ELBlk1} ausgedrückt, die in Abhängigkeit der Unsicherheiten für die Alternative $bELBlk = 2$ ermittelt werden kann durch:

$$p_{ELBlk1} = 1 - p_{ELBlk2} \quad (2.7)$$

- **bELBlk = 2:** Der ELFW ist zum Kontrollbereich im falschen Block gegangen. Diese Situation kann sich z. B. durch Missverständnisse in der Kommunikation mit dem SL ergeben haben. In Anlehnung an THERP wird dafür eine Wahrscheinlichkeit von 0,001 als Referenzwert abgeschätzt. Dabei wird angenommen, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit, einen falschen Anlagenblock aufzusuchen etwas geringer ist als diejenige, innerhalb des Blocks zu einem falschen Raum zu gehen. Die epistemische Unsicherheit der Eintrittswahrscheinlichkeit, dass sich der ELFW zum Kontrollbereich im falschen Block begibt, wird durch die Verteilung p_{ELBlk2} ausgedrückt, die einer Beta-Verteilung (0,5;499,5) mit dem Erwartungswert 0,001 folgt, d. h. $p_{ELBlk2} = \text{Beta}(0,5;499,5)$.

Manuelles Auslösen der Sprühwasserlöschanlage im Brandraum

In Abschnitt 2.1 wurde von der Annahme ausgegangen, dass die automatische Auslösung der Sprühwasserlöschanlage (FLA) im Brandraum nicht verfügbar ist. Allerdings besteht die Möglichkeit, die Löschanlage manuell auszulösen. Dies kann prinzipiell über den ‘Steuerschrank für die Sprühwasserlöschanlage’ direkt vor der Tür vom Flur zum Brandraum erfolgen. Es wird jedoch angenommen, dass die Motorarmatur nicht läuft, da die Automatik ausgefallen ist. Deshalb muss man sich auf die andere Raumseite begeben. Dort muss das Motorgetriebe ausgekuppelt und das Ventil von Hand aufgefahren werden. Dabei kann die Absperrarmatur S119 versehentlich zu verriegelt sein, oder das Personal ist nicht in der Lage, die Armatur S126 von Hand zu öffnen. Damit kann die FLA manuell nicht ausgelöst werden. Ob die FLA manuell aktiviert werden kann oder nicht, wird durch die Variable ‘bRelFLA’ beschrieben.

- **bRelFLA = 1:** Die FLA kann manuell aktiviert werden. Die Wahrscheinlichkeit dafür wird mit 0,995 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit der Wahrscheinlichkeit, dass die FLA manuell ausgelöst werden kann, wird durch die Verteilung $p_{RelFLA1}$ ausgedrückt, die in Abhängigkeit der Unsicherheiten für die Alternative $bRelFLA = 2$ ermittelt werden kann durch:

$$p_{\text{ReiFLA1}} = 1 - p_{\text{ReiFLA2}} \quad (2.8)$$

- ***bReiFLA = 2***: Die FLA kann manuell nicht ausgelöst werden. Als Wahrscheinlichkeit dafür wird der Wert 0,005 als Referenzwert angenommen. Die epistemische Unsicherheit für die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation wird durch die Verteilung p_{ReiFLA2} ausgedrückt, die einer Beta-Verteilung (1,5;298,5) mit dem Erwartungswert 0,005 folgt, d. h. $p_{\text{ReiFLA2}} = \text{Beta}(1,5;298,5)$.

Zuverlässigkeit des Handfeuerlöschers

Handfeuerlöscher (HFL) befinden sich in größerer Anzahl in der Nähe des Raumes. Gemäß Brandschutzplan befinden sich zwei Pulverlöscher PG 12 sowie ein Kohlendioxidfeuerlöscher im Brandraum. Zwei weitere Pulverlöscher PG 12 befinden sich direkt vor dem Brandraum im Flur. Ein Pulverlöscher PG 50 (50 kg, mit Rollen) befindet sich im Nachbarraum auf der anderen Seite. Es wird davon ausgegangen, dass beim Ausfall eines HFL innerhalb kurzer Zeit ein anderer HFL verwendet werden kann, so dass hier kein Ausfall für die Benutzung eines HFL unterstellt wird.

Löschgruppe (Feuerwehr) begibt sich zum Brandraum

Wenn ein Brandalarm in der Warte ausgelöst wird, werden neben einem BL sowohl der ELFW als auch die Mannschaft der LG vom SL alarmiert. Diese begeben sich unabhängig voneinander auf den Weg zum Kontrollbereich. Wenn die LG vor dem ELFW am Kontrollbereich ankommt, beginnt die LG mit den vorbereitenden Arbeiten. Ist der ELFW noch nicht am Eingang des Kontrollbereichs eingetroffen, wenn die LG mit ihren vorbereitenden Arbeiten fertig ist, begibt sich die Löschgruppe ohne den ELFW zum Brandraum. Wenn der ELFW vor der LG am Kontrollbereich eintrifft, muss er auf die Mannschaft der LG warten, um sich zusammen mit dieser auf den Weg zum Brandraum begeben zu können. Wenn sich der ELFW und die LG zusammen auf den Weg zum Brandraum begeben, wird der ELFW als der LG zugehörig betrachtet. Im Handlungsmodell agiert dann nur noch die LG, wobei der ELFW einbezogen ist.

Wenn sich die LG zum Brandraum begibt, hängt der weitere Handlungsablauf davon ab, ob sich die LG zum richtigen Brandraum begibt oder aufgrund fehlerhafter bzw. missverständlicher Anweisung oder Gruppenkommunikation irrtümlich einen falschen Raum aufsucht. Dies wird durch die Variable 'bLGerrRm' beschrieben.

- ***bLGerrRm = 1***: Die LG begibt sich zum richtigen Raum. Die Wahrscheinlichkeit dafür wird mit 0,999 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit

der Wahrscheinlichkeit, dass sich die LG zum richtigen Raum begibt, wird durch die Verteilung $p_{LGerrRm1}$ ausgedrückt, die in Abhängigkeit der Unsicherheiten für die Alternative $b_{LGerrRm} = 2$ ermittelt werden kann durch:

$$p_{LGerrRm1} = 1 - p_{LGerrRm2} \quad (2.9)$$

- **$b_{LGerrRm} = 2$** : Die LG begibt sich irrtümlich zu einem falschen Raum. In Anlehnung an THERP wird dafür eine Wahrscheinlichkeit von 0,001 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit für die Wahrscheinlichkeit, dass sich die LG irrtümlich zu einem falschen Raum begibt, wird durch die Verteilung $p_{LGerrRm2}$ ausgedrückt, die einer Beta-Verteilung (0,5;499,5) mit dem Erwartungswert 0,001 folgt, d. h. $p_{LGerrRm2} = \text{Beta}(0,5;499,5)$.

Zuverlässigkeit der Löschausrüstung der Löschgruppe

Bzgl. der Zuverlässigkeit der Löschausrüstung der Löschgruppe werden folgende zufallsbedingte Situationen berücksichtigt, die durch die Variable 'bRelLöAusr' beschrieben werden:

- **$b_{RelLöAusr} = 1$** : Löschausrüstung ist verfügbar und kann ohne Hindernisse verwendet werden. Hierfür wird eine Wahrscheinlichkeit von 0,989 als Referenzwert angenommen. Die epistemische Unsicherheit der Wahrscheinlichkeit für die Verfügbarkeit der Löschausrüstung wird durch die Verteilung $p_{LöAusr1}$ ausgedrückt. $p_{LöAusr1}$ kann in Abhängigkeit der Unsicherheiten für die Alternativen $b_{RelLöAusr} = 2$ und $b_{RelLöAusr} = 3$ ermittelt werden durch:

$$p_{LöAusr1} = 1 - p_{LöAusr2} - p_{LöAusr3} \quad (2.10)$$

- **$b_{RelLöAusr} = 2$** : Beim Versuch, die Löschausrüstung einzusetzen, ist der Hydrant oder der Schlauch defekt. Hier muss entweder ein Ersatzschlauch besorgt werden oder ein anderer Hydrant gesucht werden. Für dieses Ereignis wird eine Wahrscheinlichkeit von 0,01 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit für die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation wird durch die Verteilung $p_{LöAusr2}$ ausgedrückt. $p_{LöAusr2}$ folgt einer Beta-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 1,5$ und $\beta = 148,5$ und Erwartungswert 0,01, d. h. $p_{LöAusr2} = \text{Beta}(1,5;148,5)$.
- **$b_{RelLöAusr} = 3$** : In diesem Fall wird die Situation berücksichtigt, dass verschiedene unvorhergesehene Ereignisse – z. B. dass durch den Ausfall des Löschwassersystems kein Wasser aus dem Anschluss verfügbar ist und das Löschwasser von anderer Stelle her besorgt werden muss – eine größere Zeitverzögerung bis zum Löschbeginn bewirken können. Es wird angenommen, dass solche unvorhergese-

nenen Ereignisse mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,001 als Referenzwert auftreten. Die epistemische Unsicherheit für die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation wird durch die Verteilung p_{BLerrRm3} ausgedrückt. p_{BLerrRm3} folgt einer Verteilung die sich herleiten lässt durch

$$p_{\text{LöAusr3}} = (1 - p_{\text{LöAusr2}}) \cdot p'_{\text{LöAusr3}} \quad (2.11)$$

Die Verteilung $p'_{\text{LöAusr3}}$ beschreibt die bedingte Verteilung der Wahrscheinlichkeit unter der Bedingung, dass das Ereignis $b_{\text{BLerrRm}} = 2$ nicht eingetreten ist. Da $(1 - p_{\text{LöAusr2}})$ Werte aufweist, die sämtlich nahe bei 1 liegen, wird näherungsweise von $p_{\text{LöAusr3}} \approx p'_{\text{LöAusr3}}$ ausgegangen. Da hier die bedingte Verteilung $p'_{\text{LöAusr3}}$ nahezu gleich der unbedingten Verteilung $p_{\text{LöAusr3}}$ ist, wird für $p_{\text{LöAusr3}}$ eine Beta-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 0,5$ und $\beta = 499,5$ geschätzt, deren Erwartungswert dem Referenzwert 0,001 entspricht, d. h. $p_{\text{BLerrRm3}} = \text{Beta}(0,5;499,5)$.

Anmerkungen

Weitere aleatorische Unsicherheiten, die im Brandbekämpfungsmodell berücksichtigt werden, beziehen sich auf die Ausführungszeiten der einzelnen Handlungen, die durch das beteiligte Anlagenpersonal bzgl. der Brandbekämpfung durchgeführt werden. Die dazu spezifizierten aleatorischen Unsicherheiten werden in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 beschrieben.

Unsicherheiten bzgl. der Zuverlässigkeit für Handfeuerlöscher (HFL) werden hier nicht spezifiziert, da angenommen wird, dass irgendein HFL, die sich in größerer Anzahl in der Nähe des Raumes befinden, funktioniert. Allerdings kann es vorkommen, dass die Löschung mit dem Handfeuerlöscher erfolglos bleibt. Diese Information wird allerdings über die Brandsimulation abgefragt. In diesem Fall, wartet der Brandläufer auf die Löschgruppe, die bereits unterwegs ist.

Abschließend werden die spezifizierten aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten in Tab. 2.1 nochmals zusammenfassend tabellarisch dargestellt:

Tab. 2.1 Zusammenfassung der berücksichtigten zufallsbedingten alternativen Situationen (aleatorische Unsicherheit) und die für deren Wahrscheinlichkeitsbewertung geschätzten epistemischen Unsicherheiten

Aleatorische Unsicherheit	Wahrscheinlichkeit (Referenzwert)	Epistemische Unsicherheit (bzgl. der Wahrscheinlichkeit)
Brandmeldesituation (ALId): 1 2 3	9,95 E-01 4.95 E-03 5.00 E-05	$p_{AL1} = 1 - p_{AL2} - p_{AL3}$ $p_{AL2} = \text{Beta}(1,5;301,5)$ $p_{AL3} = (1-p_{AL2}) \cdot p'_{AL3}$ Da $(1-p_{AL2}) \approx 1 \Rightarrow p_{AL3} \approx p'_{AL3}$. $p_{AL3} = \text{Beta}(0,5;9999,5)$
Erreichbarkeit über Funkmelder (bRelFM): 1 2 3	8,90 E-01 1,00 E-01 1,00 E-02	$p_{FM1} = 1 - p_{FM2} - p_{FM3}$ $p_{FM2} = \text{Beta}(1,5;13,5)$ $p_{FM3} \approx \text{Beta}(0,5;49,5)$ berechnet aus $p_{FM3} = (1 - p_{FM2}) \cdot p'_{FM3}$ mit $p'_{FM3} = \text{Beta}(0,5;44,5)$
BL im Kontrollbereich ja/nein (bBLKtrber): 1 2	5,00 E-01 5,00 E-01	$p_{KtrBer1} = U(0,3;0,7)$ $p_{KtrBer2} = 1 - p_{KtrBer1}$
BL erreicht Brandraum (bBLerrRm): 1 2 3	9,97 E-01 2,00 E-03 1,00 E-03	$p_{BLerrRm1} = 1 - p_{BLerrRm2} - p_{BLerrRm3}$ $p_{BLerrRm2} = \text{Beta}(0,5;248,5)$ $p_{BLerrRm3} = (1-p_{BLerrRm2}) \cdot p'_{BLerrRm3}$ Da $(1-p_{BLerrRm2}) \approx 1 \Rightarrow p_{BLerrRm3} \approx p'_{BLerrRm3}$ $p_{BLerrRm3} = \text{Beta}(0,5;498,5)$
ELFW geht zum falschen Block ja/nein (bELFWBik): 1 2	9,99 E-01 1,00 E-03	$p_{ELBik1} = 1 - p_{ELBik2}$ $p_{ELBik2} = \text{Beta}(0,5;498,5)$
Manuelles Starten der FLA (bRelFLA): 1 2	9,95 E-01 5,00 E-03	$p_{RelFLA1} = 1 - p_{RelFLA2}$ $p_{RelFLA2} = \text{Beta}(1,5;298,5)$
LG begibt sich zum Brandraum (bLGerrRm): 1 2	9,99 E-01 1,00 E-03	$p_{LGerrRm1} = 1 - p_{LGerrRm2}$ $p_{LGerrRm2} = \text{Beta}(0,5;499,5)$

Aleatorische Unsicherheit	Wahrscheinlichkeit (Referenzwert)	Epistemische Unsicherheit (bzgl. der Wahrscheinlichkeit)
Zuverlässigkeit der Lösch-ausrüstung (bRelLöAusr): 1 2 3	9,89 E-01 1,00 E-02 1,00 E-03	$p_{LöAusr1} = 1 - p_{LöAusr2} - p_{LöAusr3}$ $p_{LöAusr2} = \text{Beta}(1,5; 148,5)$ $p_{LöAusr3} = (1 - p_{LöAusr2}) \cdot p'_{LöAusr3}$ Da $(1 - p_{LöAusr2}) \approx 1 \Rightarrow p_{LöAusr3} \approx p'_{LöAusr3}$ $p_{LöAusr3} = \text{Beta}(0,5; 499,5)$
Ausführungszeiten der spezifizierten Einzelhandlungen (siehe Abschnitt 2.3)		

2.2.2 Abhängigkeiten von Handlungsabläufen vom Prozess der Brandentwicklung und damit verbundener Dynamik-Stochastik-Wechselwirkungen

Im Handlungsablauf der Brandbekämpfung treten Situationen auf, in denen die Handlungsabläufe nicht nur von Ereignissen abhängen, die zufallsbedingt eintreten, sondern auch davon abhängen, wie sich der Brand bis zum entsprechenden Zeitpunkt entwickelt hat. Außerdem können sich neben dem Prozess der Brandbekämpfung auch andere Handlungen, die vom Personal durchgeführt werden, unmittelbar auf die Brandentwicklung auswirken.

In diesem Abschnitt werden Wechselwirkungen zwischen dem Handlungsanlauf der Brandbekämpfung und dem Prozess der Brandentwicklung diskutiert, die im Rahmen der Analyse berücksichtigt werden.

Rauchaustritt unter der Tür des Brandraums zum Flur

Wenn der Brandläufer (BL) über den Brand alarmiert worden ist, begibt er sich zum Brandraum. Erreicht der BL den Brandraum zu einem bestimmten Zeitpunkt (der Zeitpunkt kann mehr oder weniger stark variieren), so nimmt er eine kurze Inspektion der Tür vor, bei der er zu erkennen versucht, ob Rauch unter der Tür austritt oder die Temperatur der Tür erhöht ist.

Erreicht der BL den Raum relativ schnell, wird sich die Rauchentwicklung durch den Brand noch nicht so weit entwickelt haben, dass Rauch unter der Brandraumtür hervortritt und für den BL sichtbar ist. Benötigt der BL einen längeren Zeitraum, um den

Brandraum zu erreichen, kann sich der Brand zum Zeitpunkt des Eintreffens des BL so stark entwickelt haben, dass Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar hervortritt. Die gleiche Situation gilt für die Löschgruppe (LG), die unterschiedlich viel Zeit benötigt, um den Brandraum zu erreichen.

In Abhängigkeit davon, ob Rauch aus dem Brandraum in den Flurbereich austritt und sichtbar ist oder nicht, werden unterschiedliche Handlungsabläufe vom BL bzw. der LG ausgeführt. Diese unterschiedlichen Handlungsabläufe werden ausführlich in Abschnitt 2.3 beschrieben.

Die Zustände des Brandes im Brandraum werden mittels des Rechenprogramms FDS simuliert. Zur Bewertung der Verrauchung wird die Prozessgröße 'Optical Density' (optische Dichte) verwendet, die am unteren Öffnungsspalt der Tür zum Flur gemessen wird. Diese Prozessgröße liefert ein Maß für die Rauchdichte pro Meter an der gemessenen Stelle.

Als Kriterium dafür, ob Rauch unter der Tür zum Flur sichtbar ist oder nicht, wurde der Referenzwert der optischen Dichte von 0,3 pro Meter am unteren Öffnungsspalt dieser Tür angenommen. D. h., wenn die optische Dichte zum Zeitpunkt, an dem der BL den Brandraum erreicht, den Wert von $0,3 \text{ m}^{-1}$ überschreitet, wird angenommen, dass Rauch unter der Tür sichtbar ist. Ist der Wert der optischen Dichte zum entsprechenden Zeitpunkt $\leq 0,3 \text{ m}^{-1}$, so wird angenommen, dass kein Rauch unter dieser Tür sichtbar ist.

Da Unsicherheit dahingehend besteht, ab welchem kritischen Wert D_{crit} der optischen Dichte sichtbarer Rauch unter der Tür zum Flur wahrgenommen werden kann, geht dieser Wert als epistemische Größe in das Modell ein. Die Unsicherheit bzgl. des kritischen Wertes D_{crit} wird durch eine Gleichverteilung zwischen $0,2 \text{ m}^{-1}$ und $0,4 \text{ m}^{-1}$ mit dem Referenzwert $0,3 \text{ m}^{-1}$ beschrieben, d. h. $D_{\text{crit}} \sim U(0,2;0,4)$.

Zum Zeitpunkt, zu dem der BL (bzw. die LG) den Brandraum erreicht, wird die Information der optischen Dichte am unteren Öffnungsspalt der Tür von der entsprechenden Prozessgröße des FDS-Codes abgefragt. Ist der Wert der Prozessgröße $> D_{\text{crit}}$, so wird angenommen, dass Rauch unter der Tür sichtbar ist. In diesem Fall wird der Variablen SmkTr der Wert 2 zugeordnet, d. h. $\text{SmkTr} = 2$. Ist der Wert der optischen Dichte $\leq D_{\text{crit}}$, so wird angenommen, dass kein Rauch unter der Tür sichtbar ist. In diesem Fall ist $\text{SmkTr} = 1$. Die Variable SmkTr wird im Handlungsmodell verwendet, um die

Rauchsituationen der Tür zum Flur zu beschreiben, wie sie zum betreffenden Zeitpunkt durch die Brandsimulation ermittelt wurde.

Wenn der BL (bzw. die LG) am Brandraum ankommt, erfolgen in Abhängigkeit davon, ob zu diesem Zeitpunkt Rauch unter der Türe des Brandraumes sichtbar ist oder nicht, verschiedene Handlungsabläufe. Die verschiedenen Handlungsabläufe resultieren in unterschiedlichen Verteilungen der Zeitpunkte, wann der BL (bzw. die LG) mit der Löschung des Brandes beginnt. Die Verteilungen beschreiben für die jeweiligen Situationen (Rauch sichtbar bzw. nicht sichtbar) die aleatorischen (stochastischen) Unsicherheiten bzgl. des Zeitpunktes des Löschbeginns. In diesem beschriebenen Fall übt die Entwicklung des Brandes durch die Rauchbildung Einfluss auf die Handlungsabläufe und damit auf die Verteilungen (aleatorische Unsicherheiten) bzgl. des Zeitpunktes des Löschbeginns aus. Diese beeinflussen wiederum die weitere Brandentwicklung nach dem Beginn der Löschung. Diese gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Prozessablauf und aleatorischer Unsicherheiten stochastischer Größen werden als sogenannte Dynamik-Stochastik Wechselwirkungen bezeichnet.

Rauchentwicklung im Brandraum

Wenn dem BL bei der Überprüfung der Tür nichts auffällt und er keinen Rauch unter dieser Tür austreten sieht, betritt er den Brandraum. Dabei wird er anhand der Verrauchung im Raum einschätzen, welche weiteren Maßnahmen er zur Brandbekämpfung ergreifen kann. Es wird davon ausgegangen, dass die maßgebliche Größe die Rauchentwicklung ist, von der die Begehbarkeit des Raumes abhängt. In Abhängigkeit der Rauchentwicklung im Brandraum ergeben sich verschiedene Handlungsabläufe.

Wenn der BL die Situation der Rauchentwicklung so einschätzt, dass er den Brandraum nicht betreten kann, so wird er versuchen, die im Brandraum installierte Sprühwasseranlage (FLA) manuell zu aktivieren. Wenn die Rauchentwicklung im Raum noch nicht so weit fortgeschritten ist, dass der BL den Raum betreten kann, so wird angenommen, dass der BL versucht den Brandherd mit dem Handfeuerlöscher (HFL) zu bekämpfen. Wenn der BL so früh am Brandraum ankommt, dass er keine Rauchentwicklung im Raum wahrnimmt, kann es vorkommen, dass der BL den Brandherd nicht erkennt.

Es wird weiter angenommen, dass die LG nach einem Brandalarm den Raum so genau kontrolliert, dass sie den Brandherd auf jeden Fall entdeckt.

Zur Bewertung der Verrauchung des Brandraums wird die Prozessgröße 'Optical Density' (optische Dichte) am Treppenaufgang des Raumes verwendet. Die Prozessgröße liefert ein Maß der Rauchdichte pro Meter an der entsprechenden Stelle.

Als Kriterium dafür, ob die Rauchentwicklung im Brandraum so stark fortgeschritten ist, dass der Raum vom BL nicht betreten werden kann, wurde der Referenzwert der optischen Dichte von 0,4 pro Meter am Treppenaufgang des Raumes angenommen. D. h., wenn die optische Dichte zu dem Zeitpunkt, wenn der BL den Brandraum betreten möchte, den Wert von $0,4 \text{ m}^{-1}$ überschreitet, wird angenommen, dass der BL den Brandraum aufgrund der starken Verrauchung nicht mehr betritt. Dies gilt nicht für die LG, von der angenommen wird, dass sie aufgrund ihrer Ausrüstung mit schwerem Atemschutz den Raum auf jeden Fall betritt, ggf. nach vorher durchgeführten Sprühstößen mit Handfeuerlöschern in die Heißgasschicht des Brandraums.

Liegt der Wert der optischen Dichte zu dem entsprechenden Zeitpunkt zwischen 0,05 und $0,4 \text{ m}^{-1}$, so wird angenommen, dass der BL den Brandraum betritt und versucht, den Brandherd mit dem Handfeuerlöscher (HFL) zu bekämpfen.

Liegt der Wert der optischen Dichte unter $0,05 \text{ m}^{-1}$, so wird für das Handlungsmodell angenommen, dass der BL zunächst keine Rauchentwicklung wahrnimmt. Der BL wird nach einiger Zeit den Raum wieder verlassen. Ist zu diesem Zeitpunkt die optische Dichte weiterhin $< 0,05 \text{ m}^{-1}$, so bleibt der Brand unentdeckt. Sobald die optische Dichte im Brandraum $0,05 \text{ m}^{-1}$ erreicht bzw. überschreitet, erkennt der BL die Rauchentwicklung und handelt entsprechend.

Da Unsicherheit darüber besteht, bis zu welchem kritischen Wert R_{crit} der optischen Dichte der Brandraum vom Brandläufer betreten wird und Löschmaßnahmen mittels Handfeuerlöscher durchführt, geht dieser Wert als epistemische Größe in das Modell ein. Die Unsicherheit bzgl. des kritischen Wertes R_{crit} wird durch eine Gleichverteilung zwischen 0,3 und 0,5 mit dem Referenzwert 0,4 beschrieben, d. h. $R_{\text{crit}} \sim U(0,3;0,5)$.

Zu dem Zeitpunkt, wann der BL die Verrauchung im Brandraum wahrnimmt und einschätzt, wird die Information der optischen Dichte am Treppenaufgang des Raumes von der entsprechenden Prozessgröße des FDS-Codes abgefragt. Ist der Wert der Prozessgröße $> R_{\text{crit}}$, so wird angenommen, dass der BL den Raum nicht betritt. In diesem Fall wird der Variablen SmkRm der Wert 3 zugeordnet, d. h. $\text{SmkRm} = 3$. Liegt der Wert der optischen Dichte zwischen $0,05 \text{ m}^{-1}$ und R_{crit} , so wird angenommen, dass

der BL den Raum betritt und den Brandherd mit dem HFL bekämpft. In diesem Fall ist $SmkRm = 2$. Ist der Wert der optischen Dichte zum betreffenden Zeitpunkt $< 0,05 \text{ m}^{-1}$, so wird der Brandherd zunächst nicht erkannt und es gilt $SmkRm = 1$.

Die Variable $SmkRm$ wird im Handlungsmodell verwendet, um die Rauchsituation im Brandraum zu beschreiben, die zu dem betreffenden Zeitpunkt vorliegt.

Obwohl für die LG angenommen wird, dass diese den Brandraum auf jeden Fall betritt und den Brandherd entdeckt, ergeben sich in Abhängigkeit der Rauchentwicklung auch für die LG verschiedene Handlungsabläufe. Bei hoher Rauchentwicklung wird sie zuerst über eine gewisse Anzahl von Sprühstößen mit Handfeuerlöschern (HFL) den Brand bekämpfen bevor sie mit einer Wärmebildkamera den Raum betritt. Bei geringer Rauchentwicklung wird sie mit ihrer Löschausrüstung und Atemmasken den Raum sofort betreten und den Brandherd gezielt bekämpfen.

Aus der genannten Beschreibung ist zu folgern, dass zwischen der Rauchentwicklung im Brandraum und den aleatorischen Unsicherheiten bzgl. des Zeitpunktes des Löschbeginns Dynamik-Stochastik Wechselwirkungen auftreten.

Verzögerung der Löschung in Abhängigkeit von der Brandentwicklung

Die Feuerwehr verwendet persönliche Schutzausrüstung und kann prinzipiell in jeder Brandraumatmosfera vorgehen. Die Geschwindigkeit des Vorrückens hängt dabei von der Rauchdichte im Brandraum ab. Falls die thermischen Bedingungen (Temperatur und Wärmestrahlung) den Angriff behindern, so wird die Umgebung durch einen Sprühstrahl mittels HFL abgekühlt, bevor das Feuer direkt bekämpft wird.

Die Zeitverzögerung der Brandbekämpfung in Abhängigkeit der optischen Dichte wird durch die Korrelation nach Purser /PUR 05/ berücksichtigt: Ab einer optischen Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$ findet eine lineare Reduktion der Gehgeschwindigkeit statt. Bei einer optischen Dichte im Bereich von $0,13 - 0,6 \text{ m}^{-1}$ nimmt die Gehgeschwindigkeit linear von $1,1 \text{ m/s}$ auf $0,2 \text{ m/s}$ ab. Die Verlängerung der Gehzeiten in Abhängigkeit der optischen Dichte wurden im Modell über die Verlängerung der Löschzeiten berücksichtigt.

Die Verzögerungszeit wird zur Zeit des Löschbeginns addiert, die über das Handlungsmodell ermittelt wurden und beschreibt in Abhängigkeit der Rauchentwicklung die Zeitverzögerung, bis zu der eine effektive Löschung möglich ist (im Folgenden als Löschzeit bezeichnet).

Für die LG (Feuerwehr) wurden die in der folgenden Tab. 2.2 aufgeführten Löscheinheiten in Abhängigkeit der optischen Dichte im Brandraum spezifiziert.

Tab. 2.2 Löscheinheiten der Löscheinheit (LG) in Abhängigkeit von der optischen Dichte im Brandraum

Optische Dichte D [m^{-1}]	Löscheinheit [s]
$< 0,13$	10
$0,13 - 0,6$	$D \cdot 80$
$> 0,6$	48

Bei einer optischen Dichte $D > 0,6 m^{-1}$, herrscht praktisch Dunkelheit, so dass die Rauchdichte keinen weiteren Einfluss hat. In diesem Fall beträgt die Löscheinheit für die LG 48 s beträgt.

Ist die optische Dichte $D = 0,13 m^{-1}$, so beträgt die Löscheinheit für die LG 10 s.

Wenn zu Beginn der Löscheinheit durch die LG beispielsweise eine optische Dichte von $D = 0,5 m^{-1}$ besteht, so wird eine Verzögerungszeit von $0,5 \cdot 80 s = 40 s$ angenommen, bis eine effektive Löscheinheit beginnen kann.

Der Brandläufer muss ohne persönliche Schutzausrüstung den Raum begehen und den Brand bekämpfen. Es wird angenommen, dass Löscheinheiten durch den BL mit HFL bei einer optischen Dichte $D < 0,4 m^{-1}$ möglich ist, jedoch mit zunehmender Verrauchung länger dauert. Erfolgt die Löscheinheit durch den BL mit dem Handfeuerlöscher, werden für das Modell folgende Löscheinheiten angenommen:

Tab. 2.3 Löscheinheiten des Brandläufers (BL) in Abhängigkeit von der optischen Dichte im Brandraum

Optische Dichte D [m^{-1}]	Löscheinheit [s]
$< 0,1$	10
$0,1 - 0,5$	$D \cdot 100$

Bei einer optischen Dichte von $D = 0,4 m^{-1}$ beträgt die Löscheinheit unter Verwendung des HFL beispielsweise $0,4 \cdot 100 s = 40 s$.

Erfolgt die erfolgreiche Brandbekämpfung (Brandlöschung) mittels der Sprühwasserlöschanlage (FLA), so wird eine Löschzeit von 10 s angenommen.

Das Ende der Löschzeit wurde allerdings nicht als Abbruchkriterium gewählt. Wenn in den Modellrechnungen das Ende der Löschzeit erreicht ist, wurde in regelmäßigen Zeitschritten die Temperatur des definierten Targets (Kabel) abgefragt. Wenn die Target-Temperatur zum Ende der Löschzeit bereits unterhalb 120 °C liegt, wird der Rechenlauf beendet, da die Löschung erfolgt und die Target-Temperatur auf einen hinreichend kleinen Wert abgesunken ist. Wenn die Target-Temperatur zum Ende der Löschzeit > 120 °C ist, wird der Rechenlauf unter der Löschbedingung so lange fortgesetzt, bis die Target-Temperatur 120 °C unterschreitet.

Das Abbruchkriterium einer Rechnung besteht darin, dass eine Löschung des Brandes stattfindet und die Target-Temperatur auf < 120 °C gefallen ist.

Öffnen der Tür zum Brandraum

Wenn die Tür vom Flur zum Brandraum entweder durch Brandläufer (BL), Rundgänger (RG) oder Löschgruppe (LG) geöffnet wird, so erfolgt ein Sauerstoffeintrag in den Raum, der den Brand weiter anfachen kann. Normalerweise schließt sich die Tür automatisch innerhalb relativ kurzer Zeit. In diesem Fall wird der Einfluss der Sauerstoffzufuhr auf die Brandentwicklung nicht sehr groß sein. Wenn sich die Tür aus verschiedenen Gründen nicht automatisch schließt und geöffnet bleibt, wird der Einfluss auf die Brandentwicklung erheblich größer sein.

Im Rahmen der Brandbekämpfung ist der Einfluss des Personals auf die Brandentwicklung nicht nur durch den Löschvorgang gegeben, sondern schon vorher, wenn die Mannschaft die Tür zum Brandraum öffnet und diese im weiteren Handlungsablauf zufallsbedingt offen bleibt.

2.3 Beschreibung der im Handlungsmodell berücksichtigten Handlungsabläufe

Zunächst wurden für den ausgewählten Referenzfall die Handlungen des Personals bei der Branderkennung und Brandbekämpfung systematisch erfasst und in ein statisches Handlungsmodell eingebunden. Erfasst wurden Handlungen, die in den Prozeduren der Brandschutzordnung der Referenzanlage beschrieben sind und im Brandfall ange-

wendet werden sollen. Nach der Erstellung des statischen Handlungsmodells in Form eines Flussdiagramms wurden Situationen spezifiziert, bei denen sich zufallsbedingt verschiedene Möglichkeiten ergeben können. Diese spezifizierten zufallsbedingten Alternativen stellen aleatorische Unsicherheiten dar, die in Abschnitt 2.2.1 ausführlich beschrieben wurden.

Es hat sich herausgestellt, dass sich die Darstellung eines Handlungsablaufs durch ein Flussdiagramm zur Modellierung eines dynamischen Handlungsmodells nicht gut eignet. Zum einen wird das Flussdiagramm bei komplexeren Anwendungen schnell unübersichtlich, wodurch es relativ anfällig für Fehler ist. Zum anderen sind die Informationen des Flussdiagramms nur sehr mühsam aus dem Diagramm abzulesen. Außerdem können in einem Flussdiagramm viele der zur Modellierung eines dynamischen Handlungsablaufs notwendigen Detailinformationen nicht dargestellt werden.

Um diese Schwachstellen zu vermeiden, wurde untersucht, anhand welcher Hilfsmittel und Darstellungen eine möglichst benutzerfreundliche Modellierung eines dynamischen Handlungsablaufs erfolgen kann. Als ein benutzerfreundliches und geeignetes Hilfsmittel hat sich ein Mind-Mapping-Tool erwiesen, mit dem Handlungsabläufe übersichtlich dargestellt werden können, Änderungen einfach durchzuführen sind und bzgl. der Handlungen eine Vielzahl von Detailinformationen eingegeben werden können.

Die in dieser Arbeit dargestellten Diagramme der modellierten Handlungsabläufe wurden mit dem Open Source Tool 'FreeMind' (<http://freemind.sourceforge.net>) erstellt. 'FreeMind' ist ein Werkzeug, mit dem sogenannte Mind-Maps schnell und einfach erstellt werden können. Ein Mind-Map bezeichnet dabei eine Darstellungsform, die man z. B. zum Planen und visuellen Darstellen eines Themengebietes oder Prozessablaufs nutzen kann.

Um die Abläufe der Brandbekämpfung als einen dynamischen Prozess modellieren zu können, wurde das entworfene statische Handlungsmodell detaillierter beschrieben. Dazu wurden Handlungsabläufe, die sich in Abhängigkeit von zufälligen Ereignissen ergeben können, durch Einzelhandlungen (Basishandlungen) beschrieben, die vom beteiligten Anlagenpersonal ausgeführt werden. Die Einzelhandlungen können dabei einfache Tätigkeiten sein, wie z. B. die Bedienung eines Schaltknopfes, aber auch Handlungen beschreiben, im Rahmen der Kommunikation durchgeführt werden, wie z. B. die Anweisung des Schichtleiters zur Durchführung einer Handlung oder die Bestätigung über die Rückmeldung durchgeführten Handlung.

Eine wesentliche Information, die den spezifizierten Einzelhandlungen zugeordnet werden muss, ist die Zeit, die das jeweilige Personal zur Durchführung der Basishandlung benötigt. Der Mensch reagiert gewöhnlich nicht mit konstanter Reaktionszeit auf den Eintritt eines Ereignisses und benötigt für die Ausführung der gleichen Handlung auch unter konstanten Ausführungsbedingungen normalerweise unterschiedlich viel Zeit. Diese zeitlichen Schwankungen ergeben sich aus vielfältigen Faktoren, die von der Art und dem Ausmaß vorangehender Beanspruchungen über Leistungsschwankungen in Abhängigkeit der Tageszeit oder persönlichem Stress bis hin zu individuellen Leistungsunterschieden reichen. Aufgrund der zufälligen zeitlichen Variationen, werden die Ausführungszeiten von Einzelhandlungen in der Regel als Zufallsvariable betrachtet, die einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen. Da es sich bei den Einzelhandlungen überwiegend um einfache elementare Tätigkeiten handelt, lassen sich die Verteilungen der Ausführungszeiten in der Regel relativ einfach durch Expertenurteil abschätzen, ohne auf Daten aus der Betriebserfahrung oder experimentelle Daten zurückgreifen zu müssen. Bzgl. des vorliegenden Handlungsmodells basieren die Zeitverteilungen zu einem großen Teil auf Expertenangaben, die vor Ort in der Referenzanlage erhoben wurden.

Neben der Ausführungszeit der Handlung werden den elementaren Einzelhandlungen noch die Attribute zugeordnet, wer die Handlung ausführt und auf welche Person bzw. welche technische Komponente sich die die Handlung auswirkt. Diese Attribute sind relevant, um den Handlungsablauf als dynamischen Prozess modellieren und simulieren zu können.

In Abschnitt 2.3.1 werden die modellierten Handlungsabläufe unter der Bedingung einer auslegungsgemäß funktionierenden Brandmeldeanlage beschrieben, bei dem Alarmmeldungen von mindestens zwei Brandmeldern in der Warte eingehen. Abschnitt 2.3.2 beschreibt die Handlungsabläufe unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage nicht anforderungsgemäß funktioniert. In diesem Fall geht in der Warte keine Brandmeldung ein.

Die in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 beschriebenen Handlungsabläufe werden in Form von Handlungslisten beschrieben, die in codierter Form in den entsprechenden Eingabedatensatz des Crew-Modul eingegeben werden müssen. Zur Erstellung der codierten Datensätze für das Crew-Moduls wurde in /KLO 14/ eine benutzerfreundliche Oberfläche entwickelt.

Die Handlungslisten bestehen aus einer Reihenfolge von Einzelhandlungen, die von bestimmten Bedingungen abhängen. Die Definition jeder Einzelhandlung setzt sich aus vier Elementen zusammen, die folgende Informationen beinhalten:

- Person, die die Handlung ausführt,
- Kurzbezeichnung der Einzelhandlung. Die Kurzbezeichnung soll eine Gedankenstütze darstellen, woraus die Handlung besteht,
- Person oder Komponente, auf die die Handlung einen Effekt hat,
- Zeit, die für die Ausführung der Basishandlung benötigt wird.

Die Information einer Basishandlung besteht somit aus einem Vektor mit vier Elementen. Zwei Basishandlungen unterscheiden sich genau dann, wenn die Vektoren der beiden Basishandlungen nicht identisch sind. Wenn sich z. B. zwei Basishandlungen lediglich durch unterschiedliche Zeitangaben unterscheiden, dann sind die Basishandlungen als unterschiedlich zu betrachten. Zur besseren Übersicht und um Verwechslungen zu vermeiden, sollten in diesem Fall auch unterschiedliche Kurzbezeichnungen für die Basishandlungen gewählt werden,

Die Nummern der Handlungslisten dienen ausschließlich der Identifikation der Handlungslisten und können vom Benutzer beliebig gewählt werden. Es soll ausdrücklich betont werden, dass fortlaufende Nummern der Handlungslisten keine Bedeutung für den chronologischen Ablauf der Handlung haben. Es hat sich jedoch als hilfreich erwiesen, wenn Identifikationsnummern für die Handlungslisten einer bestimmten Struktur folgt, die der Benutzer beliebig festlegen kann.

Um zu demonstrieren, welche Flexibilität bei der Modellierung von Handlungsabläufen möglich ist, werden bei der Beschreibung der Handlungsabläufe zum Teil Basishandlungen verwendet, die sehr detailliert sind und nur sehr wenig Zeit beanspruchen. Teilweise werden auch Basishandlungen definiert, die eine komplexere Situation beschreiben und für die eine mehr oder weniger große Zeitverteilung angenommen wird. Die komplexeren Basishandlungen könnten in einem weiteren Analyseschritt in feinere Basishandlungen zerlegt werden, um genauere Schätzungen bzgl. der Zeitverteilungen für Handlungsabläufe ermitteln zu können.

2.3.1 Handlungsablauf bei auslegungsgemäßer Funktion der Brandmeldeanlage

Es wird von der Situation ausgegangen, dass im betreffenden Raum ein Brand ausgebrochen ist und die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert. Für diesen Fall sind im Modell des Handlungsablaufs folgende Personen beteiligt:

- der Schichtleiter in der Warte (SL),
- ein Brandläufer (BL), der vom Schichtleiter alarmiert wird,
- der Einsatzleiter der Feuerwehr (ELFW) und
- die Personen der Feuerwehr bzw. Löschgruppe (LG).

Wenn die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert, geht nach Entstehung des definierten Ölbrandes, die Alarmmeldung von mindestens zwei Brandmeldern innerhalb kurzer Zeit in der Warte ein. Die Brandsimulationsrechnungen mit FDS zeigen, dass die Meldung von mindestens zwei Brandmeldern innerhalb von 9 bis 13 s nach Brandentstehung in der Warte eingehen. Ab diesem Zeitpunkt beginnen die Handlungsabläufe der Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal.

Der modellierte Handlungsablauf und die Basishandlungen der definierten Handlungslisten sind für diesen Fall in den Abbildungen Abb. 2.1 bis Abb. 2.5 dargestellt. Die Basishandlungen der Handlungsabläufe werden im Nachfolgenden im Einzelnen beschrieben. Die grafischen Darstellungen der Abbildungen Abb. 2.1 bis Abb. 2.5 wurden mit dem Werkzeug 'FreeMind' erstellt.

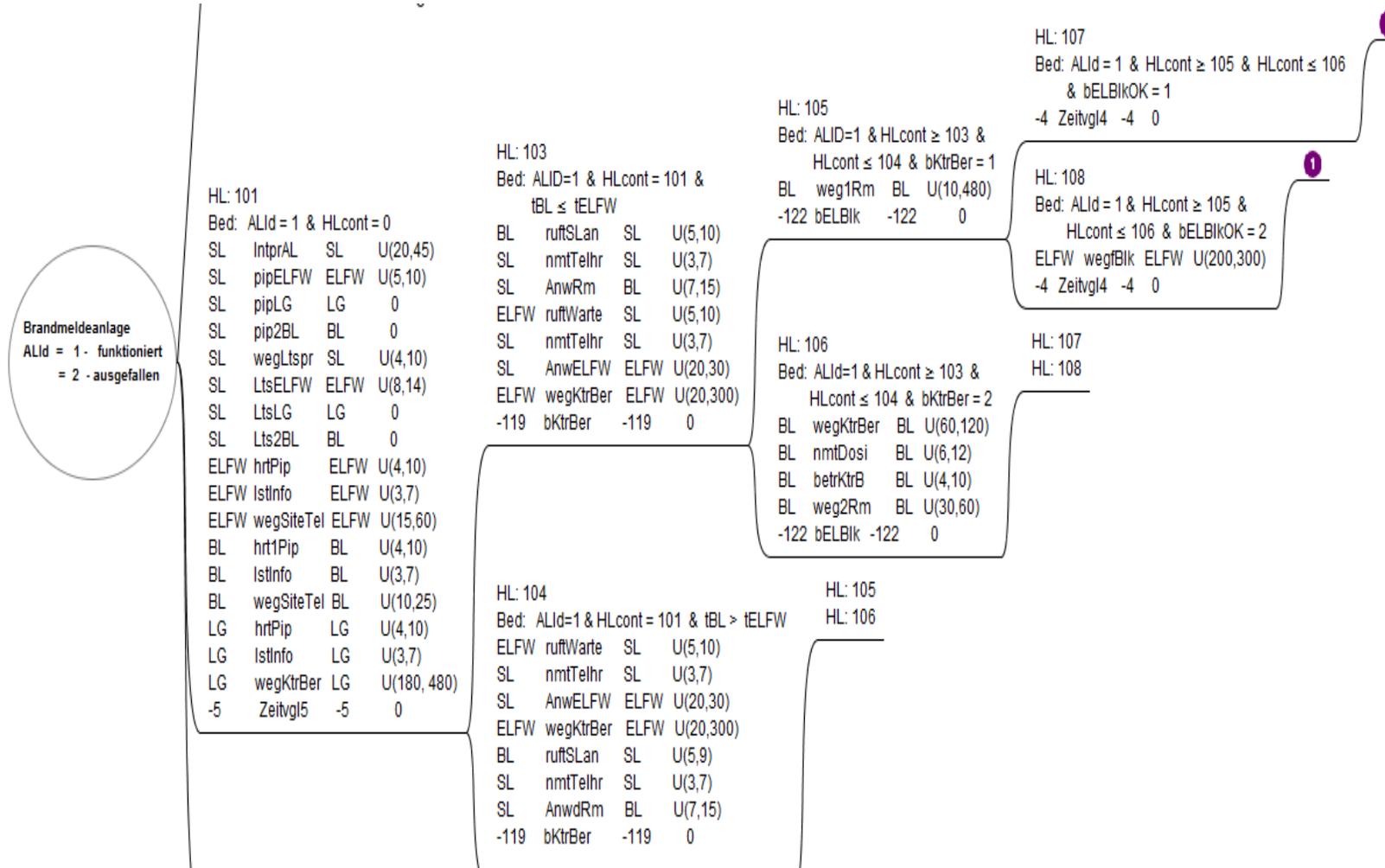


Abb. 2.1 Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist

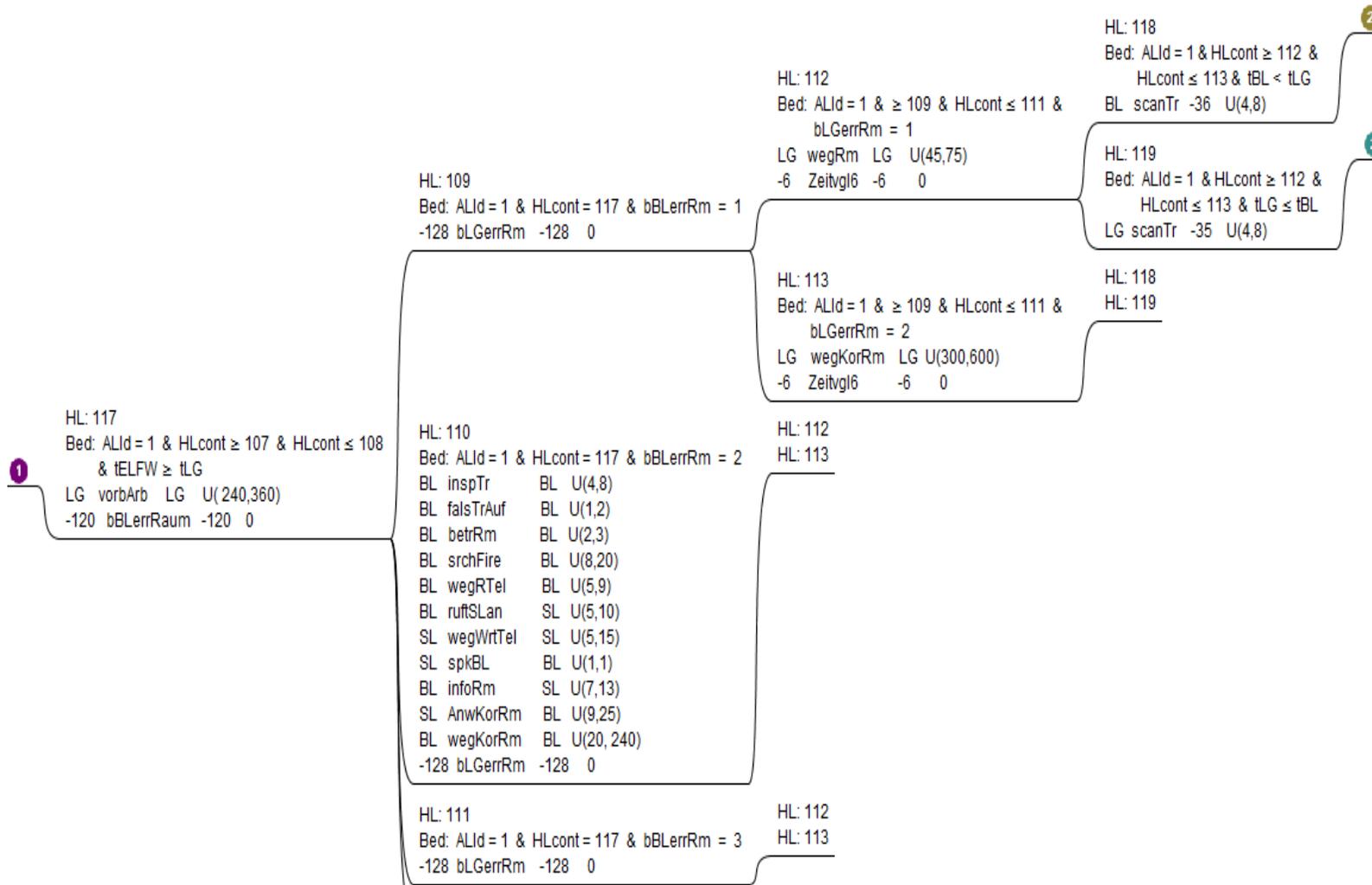


Abb. 2.2 Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist (Fortsetzung 1)

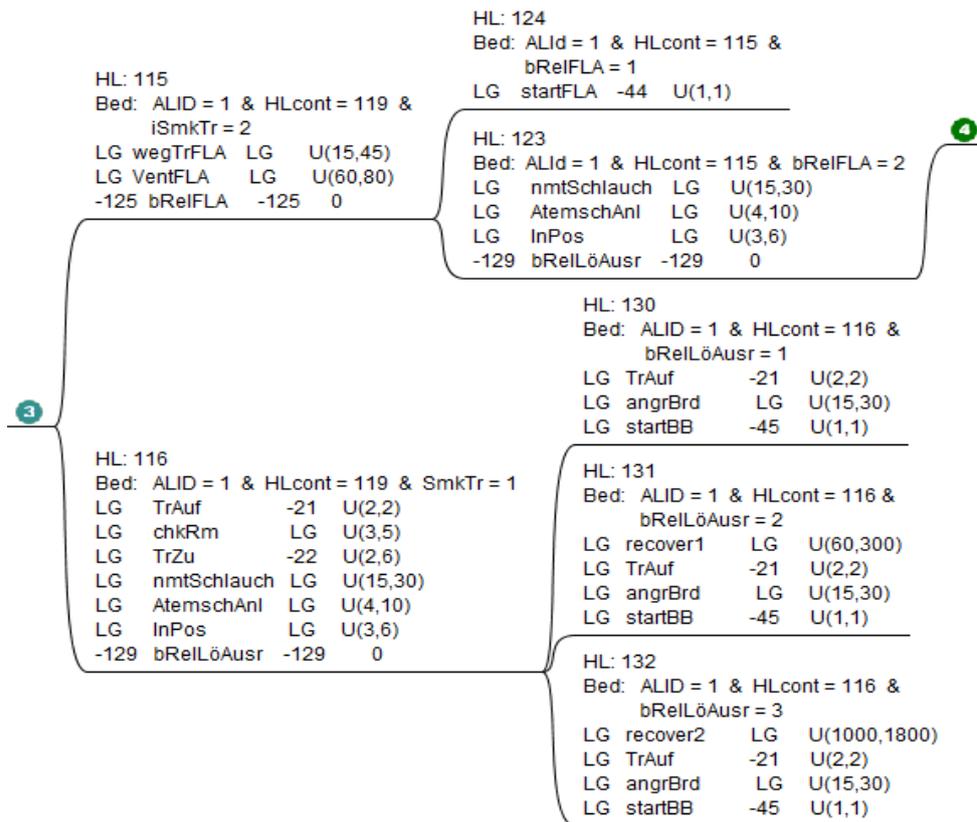


Abb. 2.4 Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist (Fortsetzung 3)

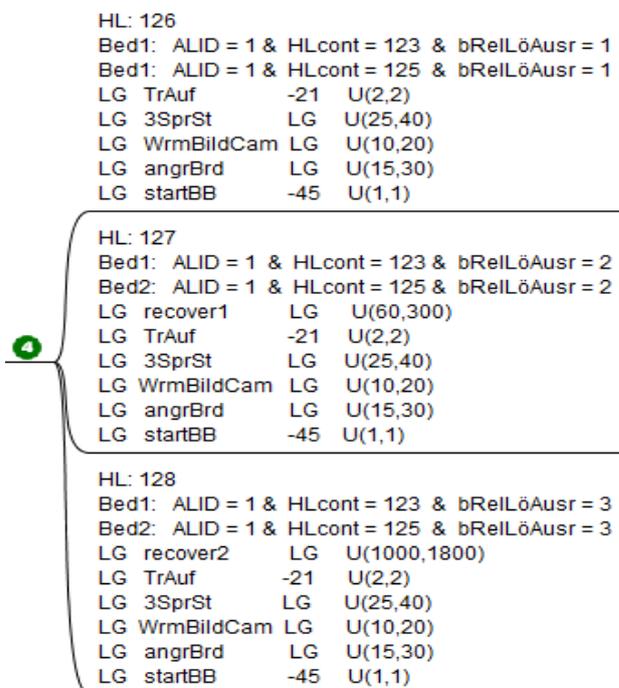


Abb. 2.5 Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist (Fortsetzung 4)

Beschreibung der Handlungslisten in Abb. 2.1

Im Folgenden werden der Handlungsablauf und die Basishandlungen der spezifizierten Handlungslisten beschrieben, die in Abb. 2.1 dargestellt sind.

- Die Handlungsliste mit der Identifikationsnummer 101 (HL 101) wird unter der Bedingung aktiviert, das:
 - die Alarmmeldungen von mindestens zwei Brandmeldern des betreffenden Raumes in der Warte eingehen (ALId = 1) und
 - bzgl. dieser Alarmmeldung noch keine Handlungsliste aufgerufen wurde. Dies wird durch die Variable HL cont = 0 ausgedrückt.

Wenn die Bedingungen erfüllt sind, wird die Handlungsliste HL 101 aufgerufen, in der die nachfolgend beschriebenen Basishandlungen ausgeführt werden:

Tab. 2.4 Beschreibung der Basishandlungen der HL 101

HL 101: Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 0
SL IntprAL SL U(20,45)	Sobald der Alarm in der Warte eintrifft, geht der SL zum Ort des Druckers, liest und interpretiert die Brandmeldung. Für die Zeitdauer, die der SL für diese Aktion benötigt, wird eine gleichverteilte Zufallszeit angenommen, die zwischen 20 und 45 s liegt. Da die Handlung den Informationsstand des SL betrifft, wird der SL als diejenige Person angegeben, auf die die Handlung einen Effekt hat.
SL pipELFW ELFW U(5,10)	Der SL geht zur Schaltstelle der Funkmeldeanlage und piepst den ELFW an. Die Handlung hat Effekt auf den ELFW und für die Ausführung der Handlung wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 5 und 10 s abgeschätzt.
SL pipLG LG 0	Gleichzeitig mit dem ELFW wird die LG durch den SL angefunkelt. Dies geschieht durch zwei untereinander liegende Knöpfe. Da die LG gleichzeitig mit dem ELFW gerufen wird, werden 0 s für die Durchführung der Handlung angesetzt. Die Basishandlung muss trotzdem aufgeführt werden, da durch die Handlung bestimmt wird, dass die LG die Information erhält, dass sie vom SL angefunkelt wird und wann dies geschieht. LG und ELFW erhalten über den Piepser bereits Basisinformationen über den Brandort, z. B. „Brand Kontrollbereich 1“.
SL Pip2BL BL 0	Gleichzeitig mit dem ELFW und der LG wird der BL durch den SL angefunkelt. Analog zur Löschgruppe werden deshalb 0 s für die Durchführung der Handlung angesetzt, da der Ruf gleichzeitig erfolgt. Um zu gewährleisten, dass der BL die Information erhält, dass er angefunkelt wird und wann dies geschieht, muss dies als eigenständige Basishandlung modelliert werden.
SL wegLtspr SL U(4,10)	Zusätzlich zum Absetzen des Funkrufs, alarmiert der SL sowohl den ELFW als auch die LG und den BL über die Lautsprecheranlage. Dazu geht der SL zu dem Platz in der Warte, von dem aus er die Lautsprecherdurchsage absetzen kann. Zum Zurücklegen des Weges wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 4 und 10 s angenommen.

HL 101: Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 0
SL LtspELFW ELFW U(8,14)	Über die Lautsprecheranlage wird der ELFW durch wiederholte Durchsagen vom SL alarmiert. Es wird angenommen, dass die wiederholten Durchsagen des SL eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 8 und 14 s in Anspruch nehmen.
SL LtspLG LG 0	Gleichzeitig mit dem ELFW wird die LG vom SL über die Lautsprecheranlage alarmiert. Wegen der gleichzeitigen Alarmierung mit dem ELFW werden für die Durchführung dieser Basishandlung 0 s angesetzt. Da die LG durch die Lautsprecherdurchsage des SL alarmiert wird und darauf reagieren muss, muss die Situation als Basishandlung definiert werden.
SL Ltsp2BL BL 0	Gleichzeitig mit ELFW und LG wird der BL vom SL über die Lautsprecheranlage alarmiert. Wegen der gleichzeitigen Alarmierung mit dem ELFW und der LG werden für die Durchführung dieser Basishandlung analog zur LG 0 s angenommen.
ELFW hrtPiep ELFW U(4,10)	Es wird davon ausgegangen, dass der ELFW innerhalb kurzer Zeit entweder den Funkruf oder die Durchsage über den Lautsprecher hört. Dafür wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 4 und 10 s abgeschätzt.
ELFW IstInfo ELFW U(3,7)	Als Reaktion liest der ELFW entweder die Information auf seinem Funkmelder oder er reagiert nach einer gewissen Reaktionszeit auf die Lautsprecherdurchsage. Als Reaktionszeit bzw. Zeit um die Info auf dem Funkmelder zu lesen, wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 3 und 7 s angenommen.
ELFW wegSiteTel ELFW U(15,60)	Danach begibt sich der ELFW von seinem gegenwärtigen Standort zum nächsten erreichbaren Telefon. Da der Aufenthaltsort zum Zeitpunkt der Alarmierung nicht bekannt ist, muss die Situation berücksichtigt werden, dass das nächste erreichbare Telefon mehr oder weniger weit entfernt sein kann. Die Entfernung wirkt sich auf die Zeit aus, wie lange der ELFW benötigt, um das nächste Telefon zu erreichen. Um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, wird für die Zeit des ELFW, dass nächste Telefon zu erreichen, eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 15 und 60 s abgeschätzt.
BL hrt1Pip BL U(4,10)	Unabhängig vom ELFW hört auch der BL den Funkruf oder die Lautsprecherdurchsage vom SL innerhalb kurzer Zeit. Dazu wird (analog zum ELFW) auch für den BL eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 4 und 10 s geschätzt.
BL; IstInfo BL U(3,7)	Der BL liest entweder die Information auf seinem Funkmelder oder er reagiert nach einer gewissen Reaktionszeit auf die Lautsprecherdurchsage. Als Reaktionszeit bzw. Zeit um die Info auf dem Funkmelder zu lesen, wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 3 und 7 s angenommen.
BL wegSiteTel BL U(15,60)	Danach begibt sich der BL von seinem gegenwärtigen Standort zum nächsten erreichbaren Telefon. Im Gegensatz zum ELFW wird für den BL angenommen, dass für ihn das nächste Telefon schneller zu erreichen ist, da er sich innerhalb des Reaktorgebäudes befindet. Für die Zeit des BL, dass nächste Telefon zu erreichen, wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 10 und 25 s geschätzt.
LG hrtPiep LG U(4,10)	Es wird davon ausgegangen, dass unabhängig vom ELFW auch die Personen der LG den Funkruf oder die Lautsprecherdurchsage vom SL innerhalb kurzer Zeit hört. Dazu wird (analog zum ELFW) auch für die LG eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 4 und 10 s abgeschätzt.
LG IstInfo LG U(3,7)	Das jeweilige Personal der LG liest die Information auf dem Funkmelder bzw. reagiert nach einer gewissen Reaktionszeit auf die Lautsprecherdurchsage. Dafür wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 3 und 7 s geschätzt.

HL 101: Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 0
LG wegKtrBer LG U(180,480)	Danach begeben sich die Personen der LG ohne Rückfrage sofort auf den Weg zum Kontrollbereich. Die LG setzt sich aus verschiedenen Personen zusammen, die sich bei der Alarmierung an unterschiedlichen Standorten befinden, die unterschiedlich weit vom Kontrollbereich entfernt sind. Um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, wird für den Zeitbedarf eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 180 s und 480 s abgeschätzt, bis sich eine Mindestzahl von Personen, die eine LG bilden können, am Eingang des Kontrollbereichs einfindet. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Mehrheit der Personen der LG zum Kontrollbereich im richtigen Kraftwerksblock begeben.
-5 Zeitvgl5 * -5 0	Sowohl der ELFW als auch der BL befinden sich jeweils auf dem Weg zum nächsten Telefon. Wer als erster von den beiden Anweisungen vom SL erhält, hängt davon ab, wer zuerst das Telefon erreicht. Dieser Vergleich wird durch die Basishandlung 'Zeitvgl5' durchgeführt. Durch die Codierung -5 führen die ProgrammROUTINEN des Crew-Moduls den Zeitvergleich durch, ob zuerst der ELFW oder der BL das Telefon erreicht, um den SL zurückzurufen.

* Der Zeitvergleich 'Zeitvgl5' stellt zwar keine Handlung des Anlagenpersonals im eigentlichen Sinne dar. Zeitvergleiche sind aber für den Handlungsablauf insgesamt wichtig. Deshalb werden Zeitvergleiche grundsätzlich zu den Basishandlungen gezählt. Die Funktion der Codierungen der Zeitvergleiche muss im Eingabedatensatz des Crew-Moduls spezifiziert werden.

Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob zuerst der Brandläufer (BL) oder der Einsatzleiter der Feuerwehr (ELFW) das Telefon erreicht, um den SL zurückzurufen. Deshalb muss die Handlungsliste HL 101 an dieser Stelle unterbrochen werden. Die alternativen Handlungsabläufe, die auf HL 101 anschließen, werden durch die Handlungslisten HL 103 und HL 104 beschrieben.

- **HL103** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - die Alarmierungssituation ALId = 1 vorliegt,
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL101 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont = 101) und
 - der BL vor dem ELFW das Telefon erreicht, um den SL anzurufen. Dies wird bezeichnet durch $t_{BL} \leq t_{ELFW}$. (Für den Fall, das beide zur gleichen Zeit das Telefon erreichen, wird dem BL der Vorrang gegeben, da dieser normalerweise den Brandraum schneller erreichen kann).

Tab. 2.5 Beschreibung der Basishandlungen der HL 103

HL 103 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 101 und tBL < tELFW
BL ruftSLan SL U(5,10)	Sobald der BL das nächste Telefon erreicht hat, wählt er die Nummer der Warte, um den SL anzurufen. Für diese Handlung wird eine gleichverteilte Zufallszeit angenommen, die zwischen 5 und 10 s liegt. Dabei wird angenommen, dass der BL die Nummer der Warte kennt oder diese über Kurzwahl zu erreichen ist. Die Handlung wirkt sich auf den SL aus, der den Anruf entgegen nehmen muss.
SL nmtTelhr SL U(4,7)	Der SL, der sich in der Nähe des Telefons aufhalten wird, da er den Rückruf aufgrund der Alarmierung erwartet, nimmt den Telefonhörer ab. Es wird angenommen, dass der SL dafür zwischen 4 und 7 s benötigt.
SL AnwRm BL U(7,15)	Der SL gibt dem BL die Information des betreffenden Raumes, in dem der Brand ausgebrochen ist und weist den BL an, sich zum Brandraum zu begeben. Für die Dauer des Gesprächs wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 7 und 15 s geschätzt.
ELFW ruftWarte SL U(5,10)	Wenn der ELFW ein Telefon erreicht hat wählt er die Nummer der Warte, um den SL zu erreichen. Dazu wird eine Zeit zwischen 5 und 10 s angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass der ELFW die Nummer der Warte kennt bzw. die Warte über Kurzwahl zu erreichen ist.
SL nmtTelhr SL U(4,7)	Solange der SL mit dem BL spricht, ist der SL blockiert und kann den Anruf nicht entgegen nehmen. Erst nach Beendigung des Gesprächs mit dem BL hört der SL den Anruf und nimmt den Telefonhörer ab. Dafür wird eine Zufallszeit zwischen 4 und 7 s angenommen. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass sich der SL, der kurz vorher den Brandalarm ausgelöst hat und den Rückruf des ELFW erwartet, sich in der Nähe des Telefons befindet.
SL AnwELFW ELFW U(20, 30)	Der SL beschreibt dem ELFW die Situation der Alarmmeldung und bespricht mit ihm kurz die weiteren Maßnahmen. Dabei wird angenommen, dass die Informationen an den ELFW etwas komplexer sind als die Anweisungen an den BL, wodurch das Gespräch etwas länger dauern wird. Für die Dauer des Gesprächs wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 20 und 30 s abgeschätzt.
ELFW wegKtrBer ELFW U(20,300)	Nach dem Gespräch mit dem SL begibt sich der ELFW zum Kontrollbereich, der vom aktuellen Standort des ELFW unterschiedlich weit entfernt sein kann. Zur Berücksichtigung dieser Unsicherheit wird für den Weg, den der ELFW bis zum Kontrollbereich zurücklegt, eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 20 und 300 s angenommen.
-119 bKtrBer * -119 0	Nachdem der BL die Anweisung vom SL bekommen hat, sich zum betreffenden Brandraum zu begeben, hängt der weitere Handlungsablauf davon ab, ob sich der BL innerhalb oder außerhalb des Kontrollbereichs befindet. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable 'bKtrBer' beschrieben. Es gilt: bKtrBer = 1 -> BL innerhalb des Kontrollbereichs bKtrBer = 2 -> BL außerhalb des Kontrollbereichs

* Die 'Basishandlung' mit der Bezeichnung 'bKtrBer' und der Codierung -119 stellt einen sogenannten Verzweigungspunkt (branching Point) dar. Ein Verzweigungspunkt beschreibt eine zufallsbedingte Situation, aus der sich mehrere (≥ 2) alternative Handlungsabläufe ergeben. Solche Verzweigungspunkte werden durch Variable ausgedrückt, denen ein kleines b (für branch) vorangestellt ist, z. B. bKtrBer. Die aleatorische Unsicherheit der Variablen bKtrBer und die zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Die Belegung der Verzweigungsvariablen erfolgt mit den entsprechenden Wahrscheinlichkeiten im Probabilistik-Modul von MCDET (siehe /KLO 14/).

- **HL 104** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste HL 101 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont = 101) und
 - der ELFW vor dem BL das Telefon erreicht, um den SL anzurufen. Dies wird bezeichnet durch tBL > tELFW.

In HL 103 wurde der Handlungsablauf unter der Bedingung beschrieben, dass der BL vor dem ELFW den SL in der Warte anruft. HL 104 beschreibt den Ablauf, wenn der ELFW den SL vor dem BL kontaktiert.

Tab. 2.6 Beschreibung der Basishandlungen der HL 104

HL 104 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 101 und tBL > tELFW
ELFW ruftWarte SL U(5,10)	Wenn der ELFW ein Telefon erreicht wählt er die Nummer der Warte, um den SL zu erreichen. Dazu wird eine Zeit zwischen 5 und 10 s angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass der ELFW die Nummer der Warte kennt bzw. die Warte über Kurzwahl zu erreichen ist.
SL nmtTelhr SL U(4,7)	Der SL, der sich in der Nähe des Telefons aufhalten wird, da er den Rückruf aufgrund der Alarmierung erwartet, nimmt den Telefonhörer ab. Es wird angenommen, dass der SL dafür zwischen 4 und 7 s benötigt.
SL AnwELFW ELFW U(20,30)	Der SL beschreibt dem ELFW die Situation der Alarmmeldung und bespricht mit ihm kurz die weiteren Maßnahmen. Für die Dauer des Gesprächs wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 20 und 30 s abgeschätzt.
ELFW wegKtrBer ELFW U(20,300)	Nach dem Gespräch mit dem SL begibt sich der ELFW zum Kontrollbereich, der vom aktuellen Standort des ELFW unterschiedlich weit entfernt sein kann. Zur Berücksichtigung dieser Unsicherheit wird für den Weg, den der ELFW bis zum Kontrollbereich zurücklegt, eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 20 und 300 s angenommen.
BL ruftSLan SL U(5,10)	Sobald der BL das nächste Telefon erreicht hat, wählt er die Nummer der Warte, um den SL anzurufen. Für diese Handlung wird eine gleichverteilte Zufallszeit angenommen, die zwischen 5 und 10 s liegt. Dabei wird angenommen, dass der BL die Nummer der Warte kennt oder diese über Kurzwahl zu erreichen ist.
SL nmtTelhr SL U(4,7)	Solange der SL mit dem ELFW spricht, ist der SL blockiert und kann den Anruf des BL nicht entgegen nehmen. Erst nach Beendigung des Gesprächs mit dem ELFW hört der SL den Anruf und nimmt den Telefonhörer ab. Dafür wird eine Zufallszeit zwischen 4 und 7 s angenommen. Dabei wird angenommen, dass sich der SL in der Nähe des Telefons befindet.
SL AnwRm BL U(7,15)	Der SL gibt dem BL die Information des betreffenden Raumes, in dem der Brand ausgebrochen ist und weist den BL an, sich zum Brandraum zu begeben. Für die Dauer des Gesprächs wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 7 und 15 s geschätzt.

HL 104 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 101 und tBL > tELFW
-119 bKtrBer * -119 0	Nachdem der BL die Anweisung vom SL bekommen hat, sich zum betreffenden Brandraum zu begeben, hängt der weitere Ablauf davon ab, ob sich der BL innerhalb oder außerhalb des Kontrollbereichs befindet. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bKtrBer beschrieben. Es gilt: bKtrBer = 1 -> BL innerhalb des Kontrollbereichs bKtrBer = 2 -> BL außerhalb des Kontrollbereichs

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 105** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 103 oder HL 104 gewesen ist (bezeichnet durch $HLcont \geq 103$ und $HLcont \leq 104$) und
 - bKtrBer = 1 (vgl. Abschnitt 2.2.1). D. h., der BL hält sich bereits innerhalb des Kontrollbereichs auf, wenn er vom SL die Anweisung erhält, sich zum betreffenden Brandraum zu begeben.

Tab. 2.7 Beschreibung der Basishandlungen der HL 105

HL 105 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont \geq 103 und HLcont \leq 104 und bKtrBer = 1
BL weg1Rm BL U(10,480)	Da sich der BL irgendwo innerhalb des Kontrollbereichs befinden kann, wird er für den Weg zum betreffenden Brandraum mehr oder weniger Zeit benötigen. Für den Weg, den der BL zum betreffenden Raum benötigt, wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 10 s und 480 s abgeschätzt. Die höheren Zeiten tragen der Situation Rechnung, dass sich der BL in einem vom Raum entfernten Teil des Kontrollbereichs befinden kann. Die sehr niedrigen Zeiten, dass sich der BL zufällig in unmittelbarer Nähe zum Brandraum befindet.
-122 bELBlk * -122 0	Nachdem der ELFW seine Anweisungen vom SL bekommen hat, hängt der weitere Ablauf von der zufallsbedingten Situation ab, ob sich der ELFW zum Kontrollbereich im richtigen Block begibt oder sich durch Missverständnisse in der Kommunikation mit dem SL zum Kontrollbereich im falschen Block begibt. Dies wird durch die Variable bELBlk ausgedrückt. Es gilt: bELBlk = 1 -> ELFW begibt sich zum Kontrollbereich im richtigen Block bELBlk = 2 -> ELFW begibt sich zum Kontrollbereich im falschen Block

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 106** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 103 oder HL 104 gewesen ist (bezeichnet durch $HLcont \geq 103$ und $HLcont \leq 104$) und

- bKtrBer = 2 (vgl. Abschnitt 2.2.1). D. h., der BL hält sich außerhalb des Kontrollbereichs auf, wenn er vom SL die Anweisung erhält, sich zum betreffenden Brandraum zu begeben.

Tab. 2.8 Beschreibung der Basishandlungen der HL 106

HL 106 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont ≥ 103 und HLcont ≤ 104 und bKtrBer = 2
BL wegKtrBer BL U(60,120)	Der BL, der sich irgendwo außerhalb des Kontrollbereichs befindet, begibt sich auf den Weg zum Eingang des Kontrollbereichs. Dabei wird angenommen, dass der SL eine Person alarmiert, die sich nicht allzu weit entfernt vom Eingang des Kontrollbereichs befindet. Für den Weg zum Eingang des Kontrollbereichs wird eine Zufallszeit zwischen 60 und 120 s abgeschätzt.
BL nmtDosi BL U(6,12)	Beim Eingang des Kontrollbereichs angekommen, nimmt der BL einen Dosimeter, die dort in großer Zahl verfügbar sind. Dafür wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 6 und 12 s geschätzt.
BL betrKtrB BL U(4,10)	Daraufhin betritt der BL den Kontrollbereich. Da der BL nicht durch den Eingangsmonitor muss und direkt durch die Tür gehen kann, wird für das Betreten eine relativ kurze Zeit zwischen 4 und 10 s angenommen.
BL weg2Rm BL U(30,60)	Hat der BL den Kontrollbereich betreten, begibt er sich zum betreffenden Brandraum, der nicht sehr weit vom Eingangsbereich entfernt ist. Für die dazu benötigte Zeit, wird eine Zufallszeit zwischen 30 und 60 s geschätzt.
-122 bELBik * -122 0	Der ELFW, der seine Anweisungen vom SL bekommen hat, begibt sich zum Eingang des Kontrollbereichs. Dabei kann zufallsbedingt die Situation eintreten, dass sich der ELFW, z. B. durch Missverständnisse in der Kommunikation mit dem SL, irrtümlich zum Kontrollbereich im falschen Block begibt. Dies wird durch die Variable bELBik ausgedrückt. Es gilt: bELBik = 1 -> ELFW begibt sich zum Kontrollbereich im richtigen Block bELBik = 2 -> ELFW begibt sich zum Kontrollbereich im falschen Block

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 107** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 105 oder HL 106 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont ≥ 105 und HLcont ≤ 106) und
 - bELBik = 1 (vgl. Abschnitt 2.2.1). D. h., der ELFW begibt sich zum Kontrollbereich im richtigen Block.

Tab. 2.9 Beschreibung der Basishandlungen der HL 107

HL 107 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont ≥ 105 und HLcont ≤ 106 und bELBik = 1
-4 Zeitvgl4* -4 0	<p>LG und ELFW befinden sich unabhängig voneinander auf dem Weg zum Kontrollbereich. Wenn die LG vor dem ELFW am Kontrollbereich ankommt, beginnt sie schon mit ihren vorbereitenden Arbeiten. Ist die LG mit ihren vorbereitenden Arbeiten fertig und der ELFW noch nicht am Eingang des Kontrollbereichs angekommen, begibt sich die Mannschaft der LG ohne den ELFW zum Brandraum.</p> <p>Wenn der ELFW vor der LG am Kontrollbereich ankommt, muss er auf die Leute der LG warten, damit sie sich zusammen auf den Weg zum Brandraum begeben können. Aufgrund der unterschiedlichen Abläufe in Abhängigkeit davon, ob zuerst die Leute der LG oder der ELFW am Eingang des Kontrollbereichs ankommen, wird an dieser Stelle ein Zeitvergleich durchgeführt.</p> <p>Der Zeitvergleich 'Zeitvgl4' mit der Codierung -4 überprüft, ob der ELFW vor der LG am Kontrollbereich ankommt. Wenn dies der Fall ist, wartet der ELFW solange, bis die LG am Kontrollbereich ankommt.</p>

* siehe Anmerkung zu HL 101

- **HL 108** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 105 oder HL 106 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont ≥ 105 und HLcont ≤ 106) und
 - bELBik = 2 (vgl. Abschnitt 2.2.1). D. h., der ELFW begibt sich irrtümlich zum Kontrollbereich im falschen Kraftwerksblock.

Tab. 2.10 Beschreibung der Basishandlungen der HL 108

HL 108 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont ≥ 105 und HLcont ≤ 106 und bELBik = 2
ELFW wegfBik ELFW U(200,300)	<p>Der ELFW geht irrtümlich zum Kontrollbereich im falschen Block. Es wird der Einfachheit halber angenommen, dass er den Fehler innerhalb einer gewissen Zeit bemerkt und sich dann unverzüglich zum Kontrollbereich in den richtigen Block begibt. Dies resultiert in einer Zeitverzögerung, bis er den Eingang des Kontrollbereichs im richtigen Block erreicht. Für die Zeitverzögerung wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 200 und 300 s angenommen.</p>
-4 Zeitvgl4* -4 0	<p>LG und ELFW begeben sich unabhängig voneinander auf den Weg zum Kontrollbereich. Wenn die LG vor dem ELFW am Kontrollbereich ankommt, beginnt sie mit ihren vorbereitenden Arbeiten. Ist die LG mit ihren vorbereitenden Arbeiten fertig und der ELFW noch nicht am Eingang des Kontrollbereichs angekommen, begibt sich die LG ohne den ELFW zum Brandraum.</p> <p>Wenn der ELFW vor der LG am Kontrollbereich ankommt, muss er auf die Leute der LG warten, damit sie sich zusammen auf den Weg zum Brandraum begeben können. Zu diesem Zweck wird an dieser Stelle ein Zeitvergleich durchgeführt.</p> <p>Der Zeitvergleich 'Zeitvgl4' mit der Codierung -4 überprüft, ob der ELFW vor der LG am Kontrollbereich ankommt. Wenn dies der Fall ist, wartet der ELFW solange, bis die LG am Kontrollbereich ankommt.</p>

* siehe Anmerkung zu HL 101

Beschreibung der Handlungslisten in Abb. 2.2

Im Folgenden werden der Handlungsablauf und die Basishandlungen der spezifizierten Handlungslisten beschrieben, die in Abb. 2.2 dargestellt sind.

- **HL 117** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 107 oder HL 108 gewesen ist (bezeichnet durch $HLcont \geq 107$ und $HLcont \leq 108$) und
 - der ELFW erst nach der LG am Kontrollbereich ankommt oder gewartet hat, bis die Mannschaft der LG am Kontrollbereich eintrifft. Dies wird ausgedrückt durch $tELFW \geq tLG$. Diese Beziehung ergibt sich durch folgende Situation: Wenn der ELFW vor der LG ankommt, muss er auf die LG warten, so dass $tELFW = tLG$. Kommt der ELFW später, hat dies auf die Arbeiten der LG keinen Einfluss, da sich die LG auch ohne den ELFW zum Brandraum begeben kann, so dass $tELFW > tLG$ gelten darf.

Tab. 2.11 Beschreibung der Basishandlungen der HL 117

HL 117 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont \geq 107 und HLcont \leq 108 und tELFW \geq tLG
LG vorbArb LG U(240,360)	Wenn die LG am Kontrollbereich ankommt, beginnt die LG mit den vorbereitenden Arbeiten. Dies geschieht unabhängig davon, ob der ELFW bereits anwesend ist und auf die LG gewartet hat oder noch nicht am Kontrollbereich angekommen ist. Für die vorbereitenden Arbeiten wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 240 und 360 s abgeschätzt.
-120 bLerrRm * -120 0	Parallel zum ELFW und zur LG befindet sich der BL auf dem Weg zum Brandraum. Dabei kann sich die Situation ergeben, dass sich der BL irrtümlich zu einem falschen Raum begibt, oder den Raum aus verschiedenen Gründen in angemessener Zeit nicht erreicht. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob sich der BL zum richtigen Brandraum geht, einen falschen Raum aufsucht oder den Brandraum in angemessener Zeit nicht erreicht. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bLerrRm beschrieben. Es gilt: bLerrRm = 1 -> BL geht zum richtigen Raum bLerrRm = 2 -> BL geht irrtümlich zu einem falschen Raum bLerrRm = 2 -> BL kann den Raum nicht erreichen.

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103. Die aleatorische Unsicherheit der Variablen bLGerrRm und die zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

- **HL 109** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 117 gewesen ist (bezeichnet durch $HLcont = 117$ und

- der Brandläufer BL sich zum richtigen Raum begibt (diese Situation wird ausgedrückt durch $bBLerrRm = 1$).

Tab. 2.12 Beschreibung der Basishandlungen der HL 109

HL 109 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 117 und bBLerrRm = 1
-128 bLGerrRm * -128 0	Während sich der BL auf dem Weg zum Brandraum befindet und die LG ihre vorbereitenden Arbeiten am Eingang des Kontrollbereichs abgeschlossen hat, begibt sich auch die LG auf den Weg zum Brandraum. Hierbei wird berücksichtigt, dass aufgrund fehlerhafter bzw. missverständlicher Anweisung oder Gruppenkommunikation irrtümlich ein falscher Raum aufgesucht werden kann. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob sich die Mannschaft der LG zum richtigen Brandraum begibt oder einen falschen Raum aufsucht. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bLGerrRm beschrieben. Es gilt: bLGerrRm = 1 -> LG geht zum richtigen Raum bLGerrRm = 2 -> LG geht irrtümlich zu einem falschen Raum

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103. Die aleatorische Unsicherheit der Variablen bLGerrRm und die zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

- **HL 110** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 117 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont = 117 und
 - der Brandläufer BL sich zu einem falschen Raum begibt (diese Situation wird ausgedrückt durch $bBLerrRm = 2$).

Tab. 2.13 Beschreibung der Basishandlungen der HL 110

HL 110 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 117 und bBLerrRm = 2
BL inspTr BL U(4,8)	Wenn der BL an dem falschen Raum angekommen ist, führt er eine kurze Inspektion der Tür durch, da er annimmt, dass es sich um den Brandraum handelt. Für die kurze Einschätzung wird eine Zeit zwischen 5 und 8 s geschätzt.
BL fTrAuf BL U(1,2)	Der Brandläufer öffnet die Tür. Für diese Basishandlung wird eine Zeit zwischen 1 und 2 s geschätzt.
BL betrRm BL U(2,3)	Der Brandläufer begibt sich in den Raum, wofür eine Zeit zwischen 2 und 3 s angenommen wird.

HL 110 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 117 und bLerrRm = 2
BL srchFire BL U(8,20)	Der BL geht davon aus, dass er sich im Brandraum befindet. Deshalb sucht er nach Anzeichen des Brandes, die er jedoch nicht erkennen kann. Es wird davon ausgegangen, dass er eine gewisse Zeit benötigt um sich zu vergewissern, dass kein Brand vorliegt. Dafür wird eine Zufallszeit zwischen 8 und 20 s angenommen.
BL wegRmTel BL U(5,9)	Nachdem der BL keine Anzeichen für einen Brand erkennt, begibt er sich zum nächsten Telefon, das sich im Raum befindet. Es wird angenommen, dass er dafür zwischen 5 und 9 s benötigt.
BL ruftSLan SL U(5,10)	Sobald der BL das nächste Telefon erreicht hat, wählt er die Nummer der Warte, um den SL anzurufen. Für diese Handlung wird eine gleichverteilte Zufallszeit angenommen, die zwischen 5 und 10 s liegt. Es wird angenommen, dass der BL die Nummer der Warte kennt oder diese über Kurzwahl zu erreichen ist.
SL wegWrtTel SL U(5,15)	Der SL, der sich irgendwo in der Warte befindet, hört das Telefon und begibt sich dorthin, um den Anruf entgegenzunehmen. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass er sich in dieser Situation in unmittelbarer Nähe des Telefons befindet, wird für die Zeit, bis er das Telefon erreicht, eine Zufallszeit zwischen 5 und 15 s abgeschätzt.
SL spkBL BL 1	Der SL meldet sich. Dafür wird eine feste Zeit von 1 s angesetzt. Diese Basishandlung muss deshalb gesondert aufgeführt werden, damit das Programm des Crew-Moduls dem BL die Zeit, wann der SL seinen Anruf entgegennimmt, zuordnen kann.
BL infoRm SL U(7,13)	Der BL informiert den SL, dass er kein Anzeichen eines Brandes im Raum entdeckt hat und schildert die Situation. Als benötigte Zeitdauer für die Information wird eine Zufallszeit zwischen 7 und 13 s abgeschätzt.
SL AnwKorRm BL U(9,25)	Auf Nachfrage des SL wird klar, dass sich der BL zum falschen Raum begeben hat. Darauf gibt der SL dem BL nochmals den Brandraum bekannt. Dies kann in relativ kurzer Zeit geschehen. Wenn der SL besonders darauf achtet, dass keine Missverständnisse mehr auftreten, wird das Telefonat etwas länger dauern. Als Zeitdauer für die Klarstellung und erneute Anweisung wird eine Zufallszeit zwischen 9 und 25 s abgeschätzt.
BL wegKorRm BL U(20, 240)	Nachdem der BL vom SL die korrigierte Anweisung erhalten hat, wird davon ausgegangen, dass er sich diesmal zum richtigen Brandraum begibt. Dieser kann in der Nähe des falschen Raumes liegen, in dem sich der BL noch befindet, oder aber von diesem weiter entfernt sein. Für die Zeit, die der BL von dem falschen Raum bis zum Brandraum benötigt, wird eine Zufallszeit zwischen 20 und 240 s abgeschätzt.
-128 bLGerrRm * -128 0	Während sich der BL zu Brandraum begibt und die LG ihre vorbereitenden Arbeiten am Eingang des Kontrollbereichs abgeschlossen hat, begibt sich auch die LG auf den Weg zum Brandraum. Hierbei wird berücksichtigt, dass aufgrund fehlerhafter bzw. missverständlicher Anweisung oder Gruppenkommunikation irrtümlich ein falscher Raum aufgesucht werden kann. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob sich die LG zum richtrichtigen Brandraum begibt oder einen falschen Raum aufsucht. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bLGerrRm beschrieben. Es gilt: bLGerrRm = 1 -> LG geht zum richtigen Raum bLGerrRm = 2 -> LG geht irrtümlich zu einem falschen Raum

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103. Die aleatorische Unsicherheit der Variablen bLGerrRm und die zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

- **HL 111** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 117 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont = 117 und
 - der Brandläufer BL den Brandraum nicht erreicht (diese Situation wird ausgedrückt durch bBLerrRm = 3).

Tab. 2.14 Beschreibung der Basishandlungen der HL 111

HL 111 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 117 und bBLerrRm = 3
-128 bLGerrRm * -128 0	Wenn der BL den Brandraum nicht erreichen kann, befindet sich parallel die LG auf dem Weg zum Brandraum, nachdem sie ihre vorbereitenden Arbeiten am Eingang des Kontrollbereichs abgeschlossen hat. Hierbei wird berücksichtigt, dass aufgrund fehlerhafter bzw. missverständlicher Anweisung oder Gruppenkommunikation irrtümlich ein falscher Raum von der LG aufgesucht werden kann. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob sich die LG zum richtigen Brandraum begibt oder einen falschen Raum aufsucht. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bLGerrRm beschrieben. Es gilt: bLGerrRm = 1 -> LG geht zum richtigen Raum bLGerrRm = 2 -> LG geht irrtümlich zu einem falschen Raum

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103. Die aleatorische Unsicherheit der Variablen bLGerrRm und die zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

- **HL 112** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 109, 100 oder 111 gewesen ist (bezeichnet durch $HLcont \geq 109$ und $HLcont \leq 111$ und
 - die LG sich zum richtigen Brandraum begibt (diese Situation wird ausgedrückt durch bLGerrRm = 1).

Tab. 2.15 Beschreibung der Basishandlungen der HL 112

HL 112 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und $HLcont \geq 109$ und $HLcont \leq 111$ und bLGerrRm = 1
LG wegRm LG U(45,75)	Die LG begibt sich vom Eingang des Kontrollbereichs zum Brandraum. Da sich der Brandraum nicht sehr weit vom Eingang des Kontrollbereichs befindet, wird für den Weg eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 45 und 75 s abgeschätzt, bis die Mannschaft der LG am Brandraum ankommt.

HL 112 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont \geq 109 und HLcont \leq 111 und bLGerrRm = 1
-6 Zeitvgl6 * -6 0	BL und LG befinden sich parallel zueinander auf dem Weg zum Brandraum. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob zuerst der BL oder die LG am Brandraum ankommt. Deshalb wird an dieser Stelle ein Zeitvergleich durchgeführt. Der Zeitvergleich 'Zeitvgl6' mit der Codierung -6 überprüft, ob zuerst der BL oder die LG am Brandraum ankommt.

* siehe Anmerkung zu HL 101

- **HL 113** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 109 , 100 oder 111 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont \geq 109 und HLcont \leq 111und
 - die LG irrtümlich zu einem falschen Raum geht (diese Situation wird ausgedrückt durch bLGerrRm = 2).

Tab. 2.16 Beschreibung der Basishandlungen der HL 113

HL 113 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont \geq 109 und HLcont \leq 111 und bLGerrRm = 2
LG wegKorRm LG U(300,600)	Die LG geht vom Eingang des Kontrollbereichs zu einem falschen Raum irgendwo innerhalb des Kontrollbereichs. Wenn die LG am Raum angekommen ist und keinen Brand bemerkt, wird sie den SL benachrichtigen, der der LG eine korrigierte Anweisung gibt. Darauf begibt sich die LG zum richtigen Brandraum. Für diesen Aktionsblock, in dem mehrere Basishandlungen zusammengefasst sind, wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 300 und 600 s abgeschätzt. An der Handlung 'wegKorRm' wird demonstriert, dass die Modellierungstiefe einer Handlung sehr flexibel gestaltet werden kann. Diese Aktion, die relativ grob modelliert wurde, könnte detaillierter in weitere Basishandlungen zerlegt werden. Mit dem Crew-Modul ist es relativ einfach möglich, dass man ausgehend von einer groben Modellierungsstruktur, komplexere Aktionen in Basishandlungen zerlegt und eine detaillierte Modellierung des Handlungsablaufs erhält.
-6 Zeitvgl6 * -6 0	BL und LG befinden sich parallel zueinander auf dem Weg zum Brandraum. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob zuerst der BL oder die LG am Brandraum ankommt. Deshalb wird an dieser Stelle ein Zeitvergleich durchgeführt. Der Zeitvergleich 'Zeitvgl6' mit der Codierung -6 überprüft, ob zuerst der BL oder die LG am Brandraum ankommt.

* siehe Anmerkung zu HL 101

- **HL 118** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 112 oder 113 gewesen ist (bezeichnet durch $HLcont \geq 112$ und $HLcont \leq 113$) und
 - der BL vor der LG am Brandraum ankommt (bezeichnet durch $tBL < tLG$).

Tab. 2.17 Beschreibung der Basishandlungen der HL 118

HL 118 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und $HLcont \geq 112$ und $HLcont \leq 113$ und $tBL < tLG$
BL scanTr -36 U(4,8)	Wenn der BL am Brandraum ankommt und die LG noch nicht vor Ort eingetroffen ist, nimmt er eine Kurze Inspektion der Tür vor, bei der er zu erkennen versucht, ob Rauch unter der Tür austritt oder die Temperatur der Tür erhöht ist. Es wird geschätzt, dass der BL dafür zwischen 4 und 8 s benötigt. Mit der Codierung -36 wird dem Programm des Crew-Moduls mitgeteilt, dass für den weiteren Handlungsablauf die Information aus der Branddynamik benötigt wird, ob zum Zeitpunkt, wann der BL den Brandraum erreicht, die Rauchentwicklung im Brandraum so stark ist, dass der Rauch unter der Tür austritt oder nicht. Dies wird bezeichnet durch die Variable 'SmkTr' = 1 -> kein Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar 'SmkTr' = 2 -> Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar (Die Belegung der Variablen SmkTr erfolgt im Eingabedatensatz 'CAAlarmList')

- **HL 119** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 112 oder 113 gewesen ist (bezeichnet durch $HLcont \geq 112$ und $HLcont \leq 113$) und
 - die Mannschaft der LG vor dem BL am Brandraum ankommt (bezeichnet durch $tLG \leq tBL$). Wenn die LG gleichzeitig mit dem BL am Brandraum ankommt, werden vorrangig die Aktionen der LG durchgeführt.

Tab. 2.18 Beschreibung der Basishandlungen der HL 119

HL 119 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont ≥ 112 und HLcont ≤ 113 und tLG ≤ tBL
LG scanTr -35 U(4,8)	Wenn die Mannschaft der LG vor oder gleichzeitig mit dem BL am Brandraum ankommt, wird eine Kurze Inspektion der Tür vorgenommen, ob Rauch unter der Tür austritt oder die Temperatur der Tür erhöht ist. Es wird geschätzt, dass die LG zwischen 4 und 8 s dafür benötigt. Mit der Codierung -35 wird dem Programm des Crew-Moduls mitgeteilt, dass für den weiteren Handlungsablauf der LG spezielle Informationen aus der Simulation der Branddynamik benötigt werden aus denen sich ergibt, ob Rauch unter der Tür austritt und außerhalb des Brandraums sichtbar ist. Für den weiteren Handlungsablauf wird hier die Information aus der Branddynamik benötigt, ob zum gegebenen Zeitpunkt, wann die LG am Brandraum eintrifft, die Rauchentwicklung im Brandraum so stark ist, dass der Rauch unter der Tür austritt oder nicht. Dies wird bezeichnet durch die Variable 'SmkTr' = 1 -> kein Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar 'SmkTr' = 2 -> Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar (Der Zustand der Variablen SmkTr wird im Eingabedatensatz 'CAAlarmList.inp' festgelegt.)

Beschreibung der Handlungslisten in Abb. 2.3

Im Folgenden werden der Handlungsablauf und die Basishandlungen der spezifizierten Handlungslisten beschrieben, die in Abb. 2.3 dargestellt sind.

- **HL 120** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 118 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont = 118) und
 - Rauch unter der Tür sichtbar ist, wenn der BL den Brandraum erreicht (bzw. durch SmkTr = 2).

Tab. 2.19 Beschreibung der Basishandlungen der HL 120

HL 120 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 118 und SmkTr = 2
BL wegTrFLA BL U(15,45)	Wenn der BL den Brandraum erreicht und Rauch unter der Tür sichtbar ist, wird davon ausgegangen, dass der BL von sich aus die Entscheidung trifft, die Feuerlöschanlage, deren automatische Auslösung ausgefallen ist, manuell zu aktivieren. Die manuelle Auslösung erfolgt zunächst über den Steuerschrank für die Sprühwasserlöschanlage direkt vor der Tür vom Flur zum Brandraum. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die Motorarmatur nicht läuft, da die Automatik ausgefallen ist. Deshalb muss man sich auf die andere Raumseite zur Ventilstation der FLA begeben. Dort ist das Motorgetriebe ausgekuppelt, das Ventil kann jedoch von Hand aufzufahren werden. Für die Zeit, die der BL zum Erreichen der Ventilstation der FLA benötigt, wird eine Zufallszeit zwischen 15 und 45 s abgeschätzt. Dabei wird der Situation Rechnung getragen, dass der BL aufgrund der Rauchentwicklung nicht durch den Raum gehen kann, sondern einmal um den Reaktor herum laufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen.
BL VentFLA BL U(60,80)	Wenn der BL an der Ventilstation angekommen ist, versucht er das Ventil von Hand aufzufahren. Dabei kann die Absperrarmatur mehr oder weniger stark verriegelt sein, so dass der BL eine gewisse Zeit benötigt, das Ventil von Hand aufzufahren. Für die benötigte Zeit, um das Ventil mit Hand zu öffnen wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 60 und 80 s abgeschätzt.
-125 bRelFLA * -125 0	Wenn das Ventil versehentlich zu stark verriegelt ist, kann die Situation eintreten, dass sich das Ventil durch den BL nicht manuell auffahren lässt. Damit kann die FLA ihre Funktion nicht erfüllen, ohne dass es an der Wasserversorgung liegt. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bRelFLA beschrieben. Es gilt: bRelFLA = 1 -> Ventil der FLA lässt sich manuell auffahren bRelFLA = 2 -> Ventil der FLA lässt sich nicht manuell öffnen

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 121** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 118 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont = 118) und
 - kein Rauch unter der Tür sichtbar ist, wenn der BL den Brandraum erreicht (bezeichnet durch SmkTr = 1).

Tab. 2.20 Beschreibung der Basishandlungen der HL 121

HL 121 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 118 und SmkTr = 1
BL TürAuf -24 U(2,3)	Wenn der BL den Brandraum erreicht und er keinen Rauch unter der Tür hervortreten sieht, öffnet er die Tür. Da kein Rauch unter der Tür sichtbar ist, wird davon ausgegangen, dass die Temperatur der Tür nicht merklich erhöht ist, was der BL feststellen könnte, wenn er den Türgriff berührt. Als Zeitdauer, die der BL für das Öffnen der Tür benötigt wird eine Zeit zwischen 2 und 3 s geschätzt. Durch die Codierung -24 erkennt das Programm, zu welchem Zeitpunkt die Tür des Brandraums durch den BL geöffnet wird. Dieser Zeitpunkt ist insofern wichtig, da er in der Analyse der Branddynamik einen Verzweigungspunkt darstellt, wobei die Tür mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wieder geschlossen wird, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aber auch fehlerhaft geöffnet bleiben kann, was sich auf die Brandentwicklung auswirkt.
BL betrRaum BL U(3,4)	Wenn der BL die Tür geöffnet hat, betritt er vorsichtig den Raum. Für die Zeit, die der BL für das Betreten des Raumes benötigt, wird eine Zufallszeit zwischen 3 und 4 s geschätzt.
BL kontrRm -37 U(8,20)	Befindet sich der BL im Brandraum, schätzt er die Rauchsituation im Brandraum ein. D. h., er versucht anhand der Rauchsituation im Raum zu beurteilen, welche Maßnahmen er ergreifen wird. Für die Dauer, um die Situation einzuschätzen und zu einer Entscheidung zu gelangen wird eine Zufallszeit zwischen 8 und 20 s geschätzt. Durch die Codierung -37 erhält das Programm die Information, dass der weitere Handlungsablauf von der Rauchentwicklung im Raum abhängt.

- **HL 15** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 120 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont = 120) und
 - die FLA manuell aktiviert werden kann (bezeichnet durch bReIFLA = 1)
 oder unter der Bedingung, dass
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 135 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 135) und
 - die FLA manuell aktiviert werden kann (bzw. durch bReIFLA = 1).

Tab. 2.21 Beschreibung der Basishandlungen der HL 15

HL 15 Basishandlung	Bedingung 1: ALId = 1 und HLcont = 120 und bRelFLA = 1 oder Bedingung 2: ALId = 1 und HLcont = 135 und bRelFLA = 1
BL startFLA -41 U(1,1)	Das Ventil der FLA wurde vom BL geöffnet und die FLA beginnt, den Raum mit Wasser zu besprühen. Von der Öffnung des Ventils bis zum Start der Wassereinsprühung wird eine feste Zeit von 1 s angenommen. Die Codierung -41 kennzeichnet den Beginn der Löschung durch die FLA, die durch den BL manuell aktiviert wurde.

- **HL 125** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 120 gewesen ist (bezeichnet durch HLcont = 120) und
 - sich das Ventil der FLA nicht manuell öffnen lässt (bzw. durch bRelFLA = 2).
 oder unter der Bedingung, dass
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 135 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 135) und
 - sich das Ventil der FLA nicht manuell öffnen lässt (bzw. durch bRelFLA = 2)

Tab. 2.22 Beschreibung der Basishandlungen der HL 125

HL 125 Basishandlung	Bedingung 1: ALId = 1 und HLcont = 120 und bRelFLA = 2 oder Bedingung 2: ALId = 1 und HLcont = 135 und bRelFLA = 2
BL infFLA LG U(5,30)	Die FLA konnte vom BL nicht manuell aktiviert werden. Da der BL weiß, dass die LG bereits alarmiert wurde und sich auf dem Weg zum Brandraum befindet, wartet er bis die LG eintrifft. Wenn die LG am Brandraum eintrifft, informiert der BL die LG, dass sich das Ventil der FLA nicht öffnen lässt und weist sie darauf hin, dass Rauch unter der Tür sichtbar ist. Für die Kommunikation wird eine Zufallszeit zwischen 5 und 30 s angenommen.
LG nmtSchl LG U(15,30)	Die LG legt den Schlauch zur Löschung aus und schließt sie an den Wasseranschluss an. Für diese Arbeiten wird eine Zufallszeit zwischen 15 und 30 s abgeschätzt.
LG AtemschAnl LG U(4,10)	Da die Rauchentwicklung im Raum sich bereits stark entwickelt hat, legt die Mannschaft der LG ihre Pressluftatemgeräte an. Dafür wird eine Zeit zwischen 4 und 10 s angenommen.
LG inPos LG U(3,6)	Danach begeben sich die Personen der LG mit ihrem Löschgerät in die Position, um die Löschung so schnell wie möglich beginnen zu können. Für diese Aktion werden zwischen 3 und 6 s zugrunde gelegt.

HL 125 Basishandlung	Bedingung 1: ALId = 1 und HLcont = 120 und bRelFLA = 2 oder Bedingung 2: ALId = 1 und HLcont = 135 und bRelFLA = 2
-129 bRelLöAusr * -129 0	Der weitere Handlungsablauf hängt von der Zuverlässigkeit der Lösch-ausrüstung ab. Beim Einsatz der Lösch-ausrüstung kann die zufallsbedingte Situation eintreten, dass der Wasseranschluss oder der Schlauch defekt ist, so dass ein Ersatzschlauch oder ein anderer Wasseranschluss benötigt wird. Eine weitere zufällige Situation kann in unvorhergesehenen Ereignissen liegen, die eine längere Verzögerung der Löschung verursachen. Die zufälligen Situationen, die die Zuverlässigkeit der Lösch-ausrüstung betreffen, werden durch die Variable bRelLöausr beschrieben: bRelLöAusr = 1 -> Lösch-ausrüstung verfügbar bRelLöAusr = 2 -> Anschluss oder Schlauch defekt bRelLöAusr = 3 -> unvorhergesehene Ereignisse

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 135** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 121 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 121) und
 - die Rauchentwicklung im Raum so groß ist, dass der BL den Raum nicht mehr betreten kann (bzw. durch SmkRm = 3).

Tab. 2.23 Beschreibung der Basishandlungen der HL 135

HL 135 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 121 und SmkRm = 3
BL wegTrFLA BL U(15,45)	Wenn die Rauchentwicklung im Raum so groß ist, dass der BL den Brandraum nicht mehr betreten kann, versucht der BL die Feuerlöschanlage, deren automatische Auslösung ausgefallen ist, manuell zu aktivieren. Dazu muss er auf die andere Raumseite zur Ventilstation der FLA. Dort ist das Motorge triebe ausgekuppelt, das Ventil kann jedoch von Hand aufgefahen werden. Für die Zeit, die der BL zum Erreichen der Ventilstation der FLA benötigt, wird eine Zufallszeit zwischen 15 und 45 s abgeschätzt. Dabei wird der Situation Rechnung getragen, dass der BL aufgrund der Rauchentwicklung nicht durch den Raum gehen kann, sondern einmal um den Reaktor herum laufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen.
BL VentFLA BL U(60,80)	Wenn der BL an der Ventilstation angekommen ist, versucht er das Ventil von Hand aufzufahren. Dabei kann die Absperrarmatur mehr oder weniger stark verriegelt sein, so dass der BL eine gewisse Zeit benötigt, das Ventil von Hand aufzufahren. Für die benötigte Zeit, um das Ventil mit Hand zu öffnen wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 60 und 80 s abgeschätzt.
-125 bRelFLA * -125 0	Wenn das Ventil versehentlich zu stark verriegelt ist, kann die Situation eintreten, dass sich das Ventil durch den BL nicht manuell auffahren lässt. Damit kann die FLA ihre Funktion nicht erfüllen, ohne dass es an der Wasserversorgung liegt. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bRelFLA beschrieben. Es gilt: bRelFLA = 1 -> Ventil der FLA lässt sich manuell auffahren bRelFLA = 2 -> Ventil der FLA lässt sich nicht manuell öffnen.

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 136** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 121 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 121) und
 - die Rauchentwicklung im Brandraum noch nicht so weit fortgeschritten ist, so dass der BL den Raum betreten kann, um den Brandherd mit dem Handfeuerlöscher zu bekämpfen (bzw. durch SmkRm = 2).

Tab. 2.24 Beschreibung der Basishandlungen der HL 136

HL 136 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 121 und SmkRm = 2
BL wegHFL BL U(4,10)	Die Rauchentwicklung ist noch nicht so weit fortgeschritten, dass der BL den Raum betritt und den nächst gelegenen Handfeuerlöscher (HFL) nimmt. HFL befinden sich in größerer Anzahl in der Nähe des Raumes, so dass angenommen werden kann, dass die Löschung mit dem HFL unter diesen Bedingungen auf jeden Fall erfolgen kann. Die Zeit bis der BL den nächsten HFL erreicht wird zwischen 4 und 10 s geschätzt.
BL prepHFL BL U(8,18)	Der BL nimmt den HFL von der Halterung und bereitet ihn zur Löschung vor. Dafür wird eine Zufallszeit zwischen 8 und 18 s geschätzt. In den längeren Zeiten sind auch die Fälle eingeschlossen, in denen der BL einen anderen HFL nehmen muss.
BL wegTrBrd BL U(3,7)	Der BL begibt sich mit dem HFL zum Brandherd. Die dafür benötigte Zeit wird zwischen 3 und 7 s abgeschätzt.
BL startHFL -42 U(2,2)	Sobald der BL den Brandherd erreicht hat, beginnt er innerhalb 2 s mit dem Handfeuerlöscher den Brand zu bekämpfen. Dies wird dem Programm des Crew-Moduls durch die Codierung -42 mitgeteilt.

- **HL 137** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 121 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 121) und
 - keine sichtbare Rauchentwicklung im Brandraum zu erkennen ist, (bzw. durch SmkRm = 1).

Tab. 2.25 Beschreibung der Basishandlungen der HL 137

HL 137 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 121 und SmkRm = 1
LG scanTr -35 U(4,8)	Da der BL keine Rauchentwicklung im Raum wahrnimmt und den Brandherd nicht findet, versucht er den SL zu benachrichtigen oder Nachbarräume zu untersuchen. Es wird angenommen, dass der BL wartet, bis die LG eintrifft. Wenn die sich LG sich dem Brandraum nähert, kann sie ggf. erkennen, dass Rauch unter der Tür austritt oder die Temperatur der Tür erhöht ist. Für die Zeit der kurzen Beobachtung der Situation wird eine Zufallszeit zwischen 4 und 8 s angenommen. Durch die Codierung -35 wird dem Programm mitgeteilt, dass die LG am Brandraum angekommen ist.

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

Beschreibung der Handlungslisten in Abb. 2.4

Im Folgenden werden der Handlungsablauf und die Basishandlungen der spezifizierten Handlungslisten beschrieben, die in Abb. 2.4 dargestellt sind.

- **HL 115** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 119 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 119) und
 - Rauch unter der Tür sichtbar ist, wenn die LG den Brandraum erreicht (bzw. durch SmkTr = 2).

Tab. 2.26 Beschreibung der Basishandlungen der HL 115

HL 115 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 119 und SmkTr = 2
LG wegTrFLA LG U(15,45)	Die LG kommt vor dem BL am Brandraum an und bemerkt, dass Rauch unter der Tür des Brandraums austritt. Es wird angenommen, dass in dieser Situation die LG versuchen wird, die FLA manuell zu aktivieren. Weiter wird davon ausgegangen, dass die Motorarmatur nicht läuft, da die Automatik ausgefallen ist. Deshalb muss man auf die andere Raumseite zur Ventilstation der FLA. Dort ist das Motorgetriebe ausgekuppelt. Das Ventil kann jedoch von Hand aufgefahren werden. Für die Zeit, die das Personal der LG zum Erreichen der Ventilstation der FLA benötigt, wird eine Zufallszeit zwischen 15 und 45 s abgeschätzt. Dabei wird der Situation Rechnung getragen, dass die LG aufgrund der Rauchentwicklung nicht durch den Raum gehen kann, sondern einmal um den Reaktor herum laufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen.

HL 115 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 119 und SmkTr = 2
LG VentFLA LG U(60,80)	Wenn die Leute der LG an der Ventilstation angekommen sind, versuchen sie das Ventil von Hand aufzufahren. Dabei kann die Absperrarmatur mehr oder weniger stark verriegelt sein, so dass die LG eine gewisse Zeit benötigt, das Ventil von Hand aufzufahren. Für die benötigte Zeit, um das Ventil mit Hand zu öffnen wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 60 und 80 s geschätzt.
-125 bRelFLA * -125 0	Wenn das Ventil versehentlich zu stark verriegelt ist, kann die Situation eintreten, dass sich das Ventil auch durch das Personal der LG nicht manuell auffahren lässt. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bRelFLA beschrieben. Es gilt: bRelFLA = 1 -> Ventil der FLA lässt sich manuell auffahren bRelFLA = 2 -> Ventil der FLA lässt sich nicht manuell öffnen.

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103.

- **HL 124** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 115 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 115) und
 - die LG die FLA manuell aktiviert (bzw. durch bRelFLA = 1).

Tab. 2.27 Beschreibung der Basishandlungen der HL 124

HL 124 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 115 und bRelFLA = 1
LG startFLA -44 U(1,1)	Das Ventil der FLA wurde vom Personal der LG geöffnet und die FLA beginnt, den Raum mit Wasser zu besprühen. Von der Öffnung des Ventils bis zum Start der Wassereinsprühung wird eine feste Zeit von 1 s angenommen. Die Codierung -44 kennzeichnet den Beginn der Löschung durch die FLA, die durch die LG manuell aktiviert wurde.

- **HL 123** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 115 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 115) und
 - die FLA durch die LG nicht manuell aktiviert werden kann (bezeichnet durch bRelFLA = 2).

Tab. 2.28 Beschreibung der Basishandlungen der HL 123

HL 123 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 115 und bRelFLA = 2
LG nmtSchlauch LG U(15,30)	Wenn die LG die FLA nicht manuell aktivieren kann, legt die LG den Schlauch zur Löschung aus und schließt sie an den Wasseranschluss an. Für diese Arbeiten wird eine Zufallszeit zwischen 15 und 30 s abgeschätzt.
LG AtemschAnl LG U(4,10)	Da bereits Rauch aus dem Brandraum austritt, legt die Mannschaft der LG ihre Pressluftatemgeräte an. Dafür wird eine Zeit zwischen 4 und 10 s angenommen.
LG inPos LG U(3,6)	Danach begeben sich die Personen der LG mit ihrem Löschgerät in die Position, um die Löschung so schnell wie möglich beginnen zu können. Für diese Aktion werden zwischen 3 und 6 s angenommen.
-129 bRelLöAusr * -129 0	Der weitere Handlungsablauf hängt von der Zuverlässigkeit der Löschschrüstung ab. Beim Einsatz der Löschschrüstung kann die zufallsbedingte Situation eintreten, dass der Wasseranschluss oder der Schlauch defekt ist, so dass ein Ersatzschlauch oder ein anderer Wasseranschluss benötigt wird. Eine weitere zufällige Situation kann in unvorhergesehenen Ereignissen liegen, die eine längere Verzögerung der Löschung verursachen. Die zufälligen Situationen, die die Zuverlässigkeit der Löschschrüstung betreffen, werden durch die Variable bRelLöAusr beschrieben: bRelLöAusr = 1 -> Löschschrüstung verfügbar bRelLöAusr = 2 -> Anschluss oder Schlauch defekt bRelLöAusr = 3 -> unvorhergesehene Ereignisse

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 116** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 119 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 119) und
 - kein Rauch unter der Tür sichtbar ist, wenn die LG den Brandraum erreicht (bzw. durch SmkTr = 1)
 oder unter der Bedingung
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 137 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 137) und
 - kein Rauch unter der Tür sichtbar ist, wenn die LG den Brandraum erreicht (bzw. durch SmkTr = 1)

Tab. 2.29 Beschreibung der Basishandlungen der HL 116

HL 116 Basishandlung	Bedingung 1: ALId = 1 und HLcont = 119 und smkTr = 1 oder Bedingung 2: ALId = 1 und HLcont = 137 und smkTr = 1
LG TürAuf -21 U(2,2)	Wenn die LG den Brandraum erreicht, und kein Rauch unter der Brandraumtüre in den Flurbereich austritt, öffnet sie die Tür des Brandraums, um die Brandsituation einzuschätzen. Dafür wird eine Zeitdauer von 2 s abgeschätzt. Durch die Codierung -21 erkennt das Programm, zu welchem Zeitpunkt die Tür des Brandraums von der LG geöffnet wird.
LG chkRm LG U(3,5)	Die LG verschafft sich einen kurzen Überblick über die Situation im Raum. Da kein Rauch unter der Tür ausgetreten ist, wird davon ausgegangen, dass die LG den Raum ohne das Absetzen von Sprühstößen betreten und den Brandherd ohne Wärmebildkamera entdecken kann. Um die Situation im Raum kurz einzuschätzen, wird eine Zufallszeit zwischen 3 und 5 s abgeschätzt.
LG TrZu -22 U(2,6)	Die LG verlässt den Raum und schließt die Tür. Dazu wird eine Zufallszeit zwischen 2 und 6 s abgeschätzt. Durch die Codierung -22 erhält das Programm die Information, dass die Tür von der LG geschlossen wird.
LG nmtSchlauch LG U(15,30)	Die LG legt den Schlauch zur Löschung aus und schließt ihn an den Wasseranschluss an. Für diese Arbeiten wird eine Zufallszeit zwischen 15 und 30 s abgeschätzt.
LG AtemschAnl LG U(4,10)	Die Mannschaft der LG legt ihre Pressluftatemgeräte an, wofür eine Zeit zwischen 4 und 10 s abgeschätzt wird.
LG inPos LG U(3,6)	Danach begeben sich die Personen der LG mit ihrem Löschgerät in die Position, um die Löschung so schnell wie möglich beginnen zu können. Für diese Aktion wird eine Zeit zwischen 3 und 6 s angenommen.
-129 bRelLöAusr * -129 0	Der weitere Handlungsablauf hängt von der Zuverlässigkeit der Löschausrüstung ab. Beim Einsatz der Löschausrüstung kann die zufallsbedingte Situation eintreten, dass der Wasseranschluss oder der Schlauch defekt ist, so dass ein Ersatzschlauch oder ein anderer Wasseranschluss benötigt wird. Eine weitere zufällige Situation kann in unvorhergesehenen Ereignissen liegen, die eine längere Verzögerung der Löschung verursachen. Die zufälligen Situationen, die die Zuverlässigkeit der Löschausrüstung betreffen, werden durch die Variable bRelLöAusr beschrieben: bRelLöAusr = 1 -> Löschausrüstung verfügbar bRelLöAusr = 2 -> Anschluss oder Schlauch defekt bRelLöAusr = 3 -> unvorhergesehene Ereignisse

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103.

- **HL 130** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 116 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 116) und
 - die Löschausrüstung der Feuerwehr verfügbar ist (bzw. durch bRelLöAusr = 1).

Tab. 2.30 Beschreibung der Basishandlungen der HL 130

HL 130 Basishandlung	Bedingung: ALld = 1 und HLcont = 116 und bRelLöAusr = 1
LG TürAuf -21 U(2,2)	Die LG öffnet die Tür, um den Brandraum zu betreten (2 s).
LG angrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt mit ihrer Löschausrüstung den Raum und versucht, den Brandherd zu lokalisieren. Die Zeitdauer, die die LG zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt, wird zwischen 15 und 30 s abgeschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (1 s) die gezielte Löschung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

- **HL 131** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALld = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 116 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 116) und
 - der Wasseranschluss oder der Schlauch der Löschausrüstung defekt ist (bzw. durch bRelLöAusr = 2).

Tab. 2.31 Beschreibung der Basishandlungen der HL 131

HL 131 Basishandlung	Bedingung: ALld = 1 und HLcont = 116 und bRelLöAusr = 2
LG recover1 LG U(60,300)	In diesem Fall wird die LG versuchen, den Schlauch an einen anderen Wasserhydranten anzuschließen bzw. einen Ersatzschlauch zu besorgen. Für diese Recovery-Aktionen wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 60 s und 300 s abgeschätzt.
LG TürAuf -21 U(2,2)	Die LG öffnet die Tür, um den Brandraum zu betreten (2 s).
LG angrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt mit ihrer Löschausrüstung den Raum und versucht, den Brandherd zu lokalisieren. Die Zeitdauer, die die LG zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt wird zwischen 15 und 30 s abgeschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (innerhalb 1 s) die gezielte Löschung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

- **HL 132** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 116 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 116) und
 - unvorhergesehene Ereignisse eintreten, die längere Recovery-Aktionen zur Folge haben (bzw. durch bRelLöAusr = 3).

Tab. 2.32 Beschreibung der Basishandlungen der HL 132

HL 132 Basishandlung	Bedingung: ALId = 1 und HLcont = 116 und bRelLöAusr = 3
LG Recover2 LG U(1000,1800)	Durch unvorhergesehene Ereignisse müssen Recovery-Aktionen durchgeführt werden, die eine längere Verzögerungszeit verursachen. Für diese Recovery-Aktionen wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 1000 s und 1800 s abgeschätzt.
LG TürAuf -21 U(2,2)	Die LG öffnet die Tür, um den Brandraum zu betreten (2 s).
LG anrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt mit ihrer Löschausrüstung den Raum und versucht, den Brandherd zu lokalisieren. Die Zeitdauer, die die LG zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt wird zwischen 15 und 30 s abgeschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (innerhalb 1 s) die gezielte Löschung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

Beschreibung der Handlungslisten in Abb. 2.5

Im Folgenden werden der Handlungsablauf und die Basishandlungen der spezifizierten Handlungslisten beschrieben, die in Abb. 2.5 dargestellt sind.

- **HL 126** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 123 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 123) und
 - die Löschausrüstung der Feuerwehr verfügbar ist (bzw. durch bRelLöAusr = 1).
 oder unter der Bedingung
 - ALId = 1 und

- die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 125 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 125) und
- die Löschausrüstung der Feuerwehr verfügbar ist (bzw. durch bRelLöAusr = 1).

Tab. 2.33 Beschreibung der Basishandlungen der HL 126

HL 126 Basishandlung	Bedingung 1: ALId = 1 und HLcont = 123 und bRelLöAusr = 1 oder Bedingung 2: ALId = 1 und HLcont = 125 und bRelLöAusr = 1
LG TrAuf -21 U(2,2)	Nachdem die LG vergeblich versucht hat, die FLA manuell zu aktivieren, hat sie sich mit der Löschausrüstung in die Löschposition gebracht und öffnet die Tür des Brandraums. Für das Öffnen der Tür wird eine Zeitdauer von 2 s angenommen. Die Codierung -21 teilt dem Programm mit, dass zu diesem Zeitpunkt die Tür des Brandraums durch die Feuerwehr geöffnet wird.
LG 3SprSt LG U(25,40)	Da bereits Rauch unter der Tür sichtbar war, was auf eine starke Rauchentwicklung im Raum hinweist, führt die LG mit ihrer Löschausrüstung 3 Sprühstöße von der Tür in den Brandraum durch. Für die benötigte Zeit zur Durchführung der 3 Sprühstöße werden zwischen 25 und 40 s abgeschätzt.
LG WrmBildCam LG U(10,20)	Nach dem Absetzen der 3 Sprühstöße wird davon ausgegangen, dass die Sicht im Raum so schlecht ist, dass die Wärmebildkamera eingesetzt wird, um den Brandherd möglichst schnell lokalisieren zu können. Deshalb holt sich die LG die Wärmebildkamera und bereitet sie für den Einsatz vor. Dafür wird eine Zeitdauer zwischen 10 und 20 s abgeschätzt.
LG angrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt den Raum und lokalisiert mit Hilfe der Wärmebildkamera den Brandherd. Die Zeitdauer, die die LG bis zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt wird zwischen 15 und 30 s geschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (1 s) die gezielte Löschung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

- **HL 127** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 123 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 123) und
 - Ausfall des Löschwassersystems (bzw. durch bRelLöAusr = 2).
 oder unter der Bedingung, dass
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 125 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 125) und

- der Wasseranschluss oder der Schlauch der Löschausrüstung defekt ist (bzw. durch bRelLöAusr = 2).

Tab. 2.34 Beschreibung der Basishandlungen der HL 127

HL 127 Basishandlung	Bedingung 1: ALId = 1 und HLcont = 123 und bRelLöAusr = 2 oder Bedingung 2: ALId = 1 und HLcont = 125 und bRelLöAusr = 2
LG recover1 LG U(60,300)	In diesem Fall wird die LG versuchen, den Schlauch an einen anderen Wasserhydranten anzuschließen bzw. einen Ersatzschlauch zu besorgen. Für diese Recovery-Aktionen wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 60 und 300 s abgeschätzt.
LG TrAuf -21 U(2,2)	Nach dieser Recovery-Aktion öffnet die LG die Tür des Brandraums. Für das Öffnen der Tür wird eine Zeitdauer von 2 s angenommen. Die Codierung -21 teilt dem Programm mit, dass zu diesem Zeitpunkt die Tür des Brandraums durch die Feuerwehr geöffnet wird.
LG 3SprSt LG U(25,40)	Da bereits Rauch unter der Tür sichtbar war, was auf eine starke Rauchentwicklung im Raum hinweist, führt die LG mit ihrer Löschausrüstung 3 Sprühstöße von der Tür in den Brandraum durch. Für die benötigte Zeit zur Durchführung der 3 Sprühstöße werden zwischen 25 und 40 s abgeschätzt.
LG rmBildCam LG U(10,20)	Nach dem Absetzen der 3 Sprühstöße wird davon ausgegangen, dass die Sicht im Raum so schlecht ist, dass die Wärmebildkamera eingesetzt wird, um den Brandherd möglichst schnell lokalisieren zu können. Deshalb holt sich die LG die Wärmebildkamera und bereitet sie für den Einsatz vor. Dafür wird eine Zeitdauer zwischen 10 und 20 s abgeschätzt.
LG angrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt den Raum und lokalisiert mit Hilfe der Wärmebildkamera den Brandherd. Die Zeitdauer, die die LG bis zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt wird zwischen 15 und 30 s abgeschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (1 s) die gezielte Löschung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

- **HL 128** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 123 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 123) und
 - unvorhergesehene Ereignisse eintreten, die längere Recovery-Aktionen zur Folge haben (bzw. durch bRelLöAusr = 3).

oder unter der Bedingung, wenn

- ALId = 1 und
- die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 125 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 125) und

- unvorhergesehene Ereignisse eintreten, die längere Recovery-Aktionen zur Folge haben (bzw. durch bRelLöAusr = 3).

Tab. 2.35 Beschreibung der Basishandlungen der HL 128

HL 128 Basishandlung	Bedingung 1: ALId = 1 und HLcont = 123 und bRelLöAusr = 3 oder Bedingung 2: ALId = 1 und HLcont = 125 und bRelLöAusr = 3
LG Recover2 LG U(1000,1800)	Durch unvorhergesehene Ereignisse müssen Recovery-Aktionen durchgeführt werden, die eine längere Verzögerungszeit verursachen. Für diese Recovery-Aktionen wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 1000 s und 1800 s abgeschätzt.
LG TrAuf -21 U(2,2)	Wenn die Wasserversorgung für die Löschung von anderer Stelle hergestellt ist, öffnet das Personal der LG die Tür des Brandraums. Für das Öffnen der Tür wird eine Zeitdauer von 2 s angenommen. Die Codierung -21 teilt dem Programm mit, dass zu diesem Zeitpunkt die Tür des Brandraums durch die Feuerwehr geöffnet wird.
LG 3SprSt LG U(25,40)	Da bereits Rauch unter der Tür sichtbar war bzw. die Rauchentwicklung im Raum relativ weit fortgeschritten ist, führt die LG mit ihrer Löschausrüstung 3 Sprühstöße von der Tür in den Brandraum durch. Für die benötigte Zeit zur Durchführung der 3 Sprühstöße werden zwischen 25 und 40 s abgeschätzt.
LG WrmBildCam LG U(10,20)	Nach dem Absetzen der 3 Sprühstöße wird davon ausgegangen, dass die Sicht im Raum so schlecht ist, dass die Wärmebildkamera eingesetzt wird, um den Brandherd möglichst schnell lokalisieren zu können. Deshalb holt sich die LG die Wärmebildkamera und bereitet sie für den Einsatz vor. Dafür wird eine Zeitdauer zwischen 10 und 20 s abgeschätzt.
LG angrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt den Raum und lokalisiert mit Hilfe der Wärmebildkamera den Brandherd. Die Zeitdauer, die die LG bis zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt wird zwischen 15 und 30 s geschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (1 s) die gezielte Löschung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

2.3.2 Brandmeldeanlage defekt

In diesem Abschnitt werden die Handlungsabläufe und die zugehörigen Basishandlungen der jeweiligen Handlungslisten für den Fall beschrieben, dass die Brandmeldeanlage defekt ist. Für diesen Fall sind im Modell des Handlungsablaufs folgende Personen beteiligt:

- der Schichtleiter in der Warte (SL),
- ein Rundgänger (RG), der zu einem zufälligen Zeitpunkt am Brandraum ankommt und den Brand entdecken kann,
- der Einsatzleiter der Feuerwehr (ELFW) und
- die Personen der Feuerwehr bzw. Löschgruppe (LG).

Wenn die Brandmeldeanlage defekt ist, geht nach Ausbruch des Brandes keine Alarmmeldung über die Brandmelder in der Warte ein. Der Brand bleibt so lange unbemerkt, bis zu einem zufälligen Zeitpunkt der Rundgänger (RG) während seines Kontrollganges den Raum betritt. Erst wenn dieser den Brand bemerkt, meldet er dies dem Schichtleiter (SL) in der Warte, der daraufhin die Löschgruppe (LG) alarmiert.

Um die Zeiteffekte analysieren zu können, wann der RG den Brand bemerkt, wird der Zeitpunkt, wann der RG am Brandraum ankommt aus einer bedingten Zeitverteilung zufällig ausgespielt. Die Bedingung ist dadurch gegeben, dass der RG während seiner Schicht von ca. 8 h den betreffenden Brandraum innerhalb einer halben Stunde (1800 s) nach Brandentstehung erreicht. Unter dieser Bedingung wird der zufällige Zeitpunkt, wann der RG den Brandraum nach der Entstehung des Brandes erreicht, aus einer Gleichverteilung zwischen 1 und 1800 s ausgespielt. Die Wahrscheinlichkeit, dass er innerhalb von 1800 s nach Brandentstehung während seiner Schicht am Brandraum ankommt, beträgt 0,0625. Diese Wahrscheinlichkeit wird in den MCDET-Rechnungen berücksichtigt.

In den MCDET-Rechnungen wird somit von der Situation ausgegangen, dass die Brandmeldeanlage defekt ist und der RG während seiner Schicht von 8 h innerhalb von 1800 s nach der Brandentstehung den Brandraum erreicht. Die Wahrscheinlichkeit dieser Situation ist gegeben durch das Produkt der Wahrscheinlichkeit, dass die Brandmeldeanlage defekt ist ($4,95 \cdot 10^{-3}$) und der Wahrscheinlichkeit, dass der RG während seiner Schicht innerhalb von 1800 s nach Brandentstehung den Brandraum erreicht (0,0625).

Der modellierte Handlungsablauf und die Basishandlungen der definierten Handlungslisten sind für diesen Fall in den Abbildungen Abb. 2.6 bis Abb. 2.8 dargestellt und werden in den folgenden Abschnitten sukzessive beschrieben.

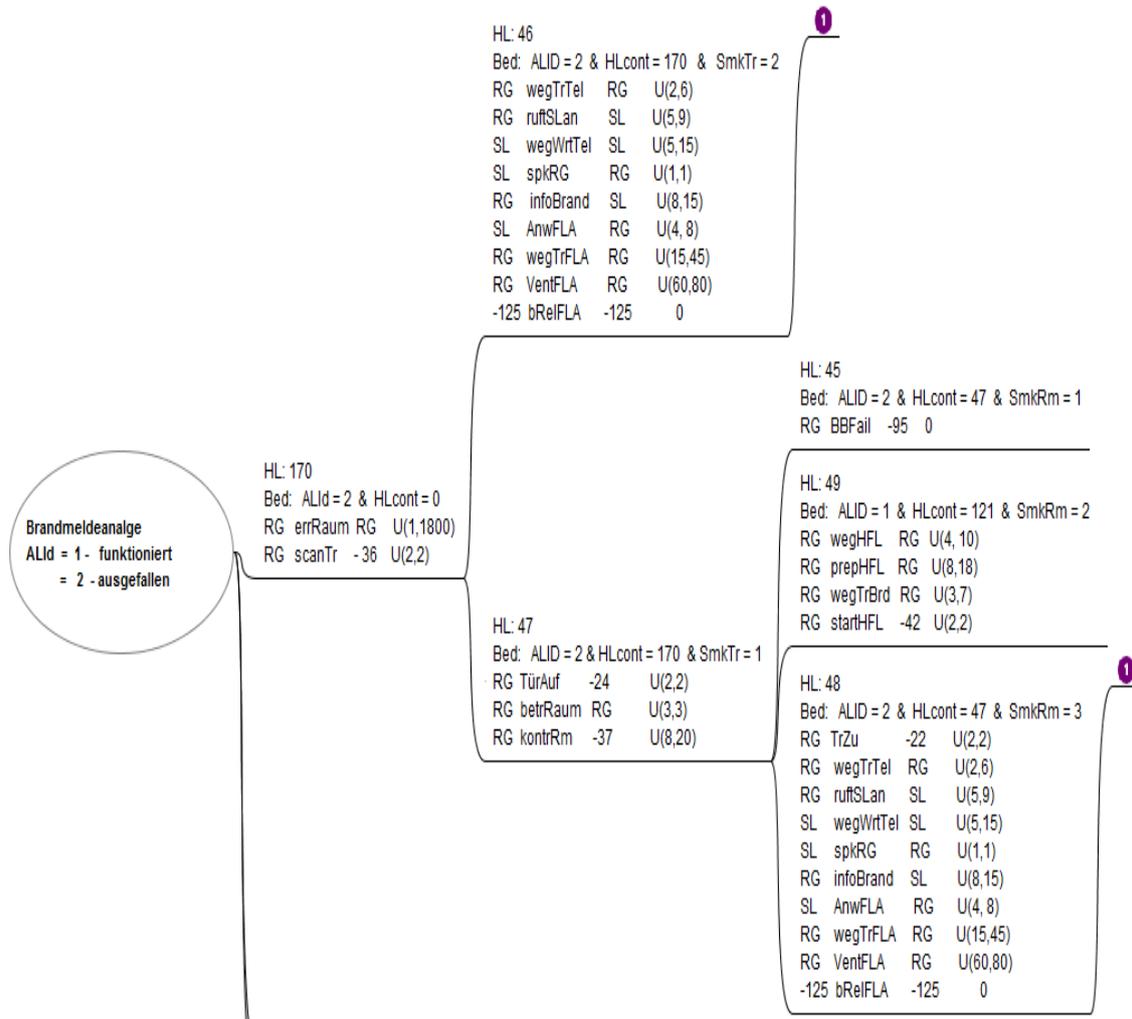


Abb. 2.6 Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage defekt ist

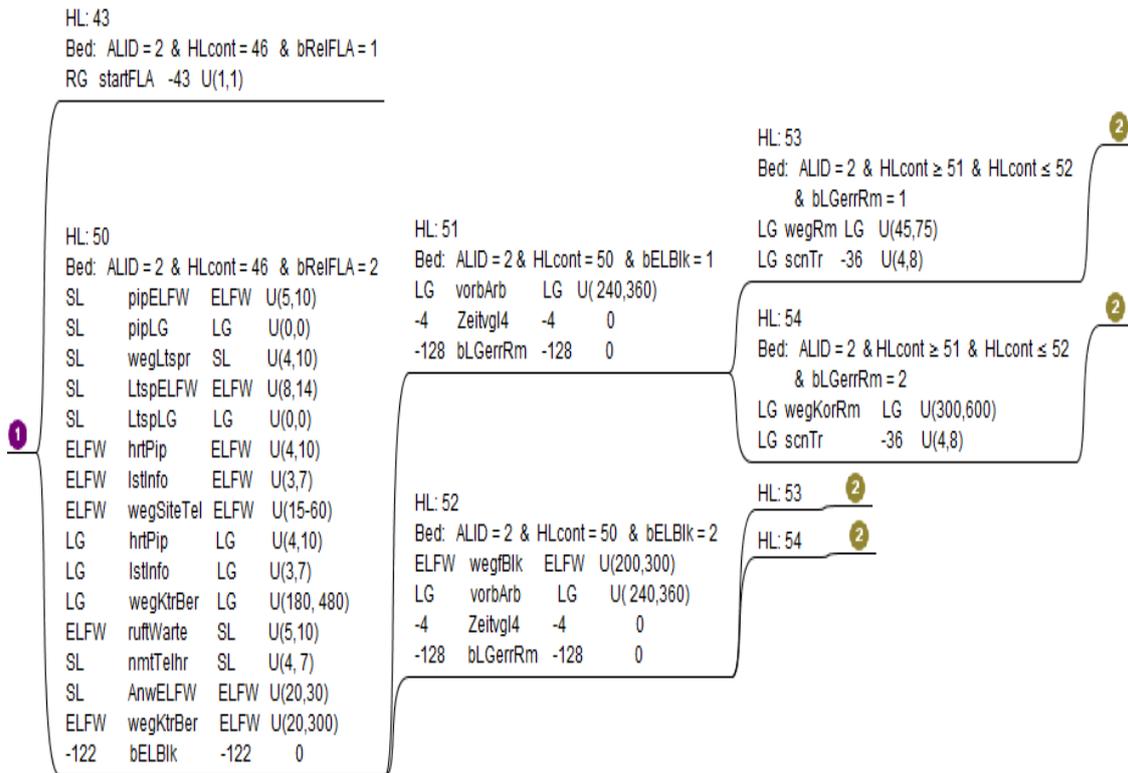


Abb. 2.7 Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage defekt ist (Fortsetzung 1).

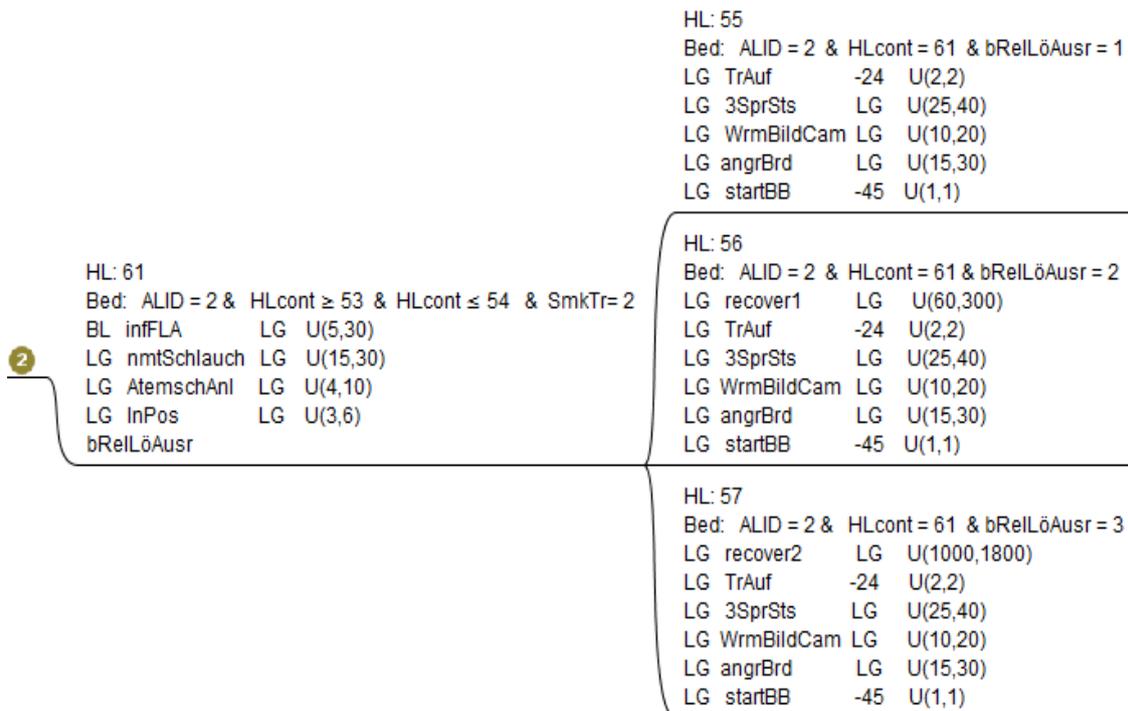


Abb. 2.8 Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage defekt ist (Fortsetzung 2).

Beschreibung der Handlungslisten in Abb. 2.6

Im Folgenden werden der Handlungsablauf und die Basishandlungen der spezifizierten Handlungslisten beschrieben, die in Abb. 2.6 dargestellt sind.

- **HL 170** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - Die Brandmeldeanlage defekt ist und keine Brandmeldung in der Warte ein-
geht (bezeichnet durch ALld = 2) und
 - noch keine Handlungsliste bzgl. dieser Alarmierungssituation aufgerufen wur-
de. (bezeichnet durch HLcont = 0).

Wenn die Bedingungen erfüllt sind, wird die Handlungsliste HL 170 aufgerufen, in der die nachfolgend beschriebenen Basishandlungen ausgeführt werden:

Tab. 2.36 Beschreibung der Basishandlungen der HL 170

HL 170 Basishandlung	Bedingung: ALld = 2 und HLcont = 0
RG errRaum RG U(1,1800)	Nachdem der Brand ausgebrochen ist, kommt der Rundgänger (RG) zu einem zufälligen Zeitpunkt zwischen 1 und 1800 s am Brandraum an. Die Wahrscheinlichkeit, dass der RG in seiner Schicht in diesem Zeitintervall den Brandraum erreicht, beträgt 0,0625.
RG scanTr - 36 U(2,2)	Der RG nähert sich der Tür des betreffenden Brandraums und erkennt ggf., dass Rauch unter der Tür austritt. Für die Zeit der kurzen Beobachtung der Tür wird ein fester Wert von 2 s angenommen (scanTr, 2 s). Mit der Codierung -36 wird dem Programm des Crew-Moduls mitgeteilt, dass für den weiteren Handlungsablauf die Information aus der Branddynamik benötigt wird, ob zum Zeitpunkt, wann der RG den Brandraum erreicht, die Rauchentwicklung im Brandraum so stark ist, dass der Rauch unter der Tür austritt oder nicht. Dies wird bezeichnet durch die Variable 'SmkTr' = 1 -> kein Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar 'SmkTr' = 2 -> Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar <i>(Die Belegung der Variablen SmkTr erfolgt im Eingabedatensatz 'CArmList')</i>

- **HL 46** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALld = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 170 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 170) und
 - der Rundgänger Rauch unter der Tür austreten sieht, wenn er sich dem Brand-
raum nähert (bzw. durch SmkTr = 2)

Tab. 2.37 Beschreibung der Basishandlungen der HL 46

HL 46 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 170 und SmkTr = 2
RG wegTrTel RG U(2,6)	Der RG bemerkt, dass Rauch unter der Tür austritt und geht zum nächst gelegenen Telefon. Da sich Telefone in der Nähe des Brandraums befinden, wird eine relativ kurze Zeit zwischen 2 und 6 s abgeschätzt, bis er das Telefon erreicht.
RG ruftSLan SL U(5,9)	Der RG nimmt den Telefonhörer ab und wählt die Nummer der Warte, wofür eine Zufallszeit zwischen 5 und 9 s geschätzt wird.
SL wegWrtTel SL U(5,15)	Der SL, der sich irgendwo in der Warte befindet geht zum Telefon. Da sich der SL mehr oder weniger weit entfernt vom Telefon befinden kann, wird für die Zeit bis er das Telefon erreicht eine Zufallszeit zwischen 5 und 15 s abgeschätzt.
SL spkRG RG U(1,1)	Der SL nimmt innerhalb 1 s den Telefonhörer ab und meldet sich. Obwohl diese Aktion aus der Sicht des Zeitbedarfs von 1 s vernachlässigbar ist, muss sie dennoch eingefügt werden, um die Verbindung zwischen SL und RG herzustellen.
RG infoBrand SL U(8,15)	Der RG informiert den SL darüber, dass am betreffenden Raum Rauch unter der Tür austritt. Für die Zeitdauer der kurzen Information wird eine Zufallszeit zwischen 8 und 15 s angenommen.
SL AnwFLA RG U(4, 8)	Der SL weist den RG an, die Feuerlöschanlage (FLA) manuell zu aktivieren, da er infolge des Rauchaustritts davon ausgeht, dass die automatische Auslösung der FLA ausgefallen ist. Für die Dauer der Anweisung werden zwischen 4 und 8 s angenommen.
RG wegTrFLA RG U(20,45)	Nachdem der RG die Anweisung vom SL entgegen genommen hat, begibt er sich zur Ventilstation der FLA, die sich auf der anderen Raumseite befindet. Dabei wird angenommen, dass die Motorarmatur nicht läuft, da die Automatik ausgefallen ist und deshalb die manuelle Auslösung nicht über den Steuerschrank für die Sprühwasserlöschanlage direkt vor der Tür vom Flur zum Brandraum erfolgen kann. Für den Weg zur Ventilstation auf der anderen Raumseite wird eine Zufallszeit zwischen 20 und 45 s angenommen. Dabei wird der Situation Rechnung getragen, dass der RG aufgrund der Rauchentwicklung nicht durch den Raum gehen kann, sondern einmal um den Reaktor herum laufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen.
RG VentFLA RG U(60,80)	An der Ventilstation der Feuerlöschanlage ist das Motorgetriebe ausgekuppelt. Das Ventil kann jedoch von Hand aufgefahren werden. Für die Zeitdauer, die der RG benötigt, das Ventil von Hand aufzufahren wird eine Zufallszeit zwischen 60 und 80 s geschätzt.
-125 bRelFLA * -125 0	Beim Versuch das Ventil von Hand aufzufahren besteht die Möglichkeit, dass die Absperrarmatur versehentlich zu stark verriegelt ist oder der RG das Ventil nicht von Hand aufbekommt. Damit kann die FLA ihre Funktion nicht erfüllen, ohne dass es an der Wasserversorgung liegt. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bRelFLA beschrieben. Es gilt: bRelFLA = 1 -> Ventil der FLA lässt sich manuell auffahren bRelFLA = 2 -> Ventil der FLA lässt sich nicht manuell öffnen.

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 47** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 170 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 170) und
 - kein Rauch unter der Tür sichtbar ist, wenn sich der RG dem Brandraum nähert (bzw. durch SmkTr = 1)

Tab. 2.38 Beschreibung der Basishandlungen der HL 47

HL 47 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 170 und SmkTr = 1
RG TürAuf -24 U(2,2)	<p>Der RG ist am Brandraum angekommen und sieht an der Tür keine Anzeichen von Rauchentwicklung. Deshalb öffnet er die Tür, wofür eine Zeit von 2s angenommen wird.</p> <p>Durch die Codierung -24 erkennt das Programm, zu welchem Zeitpunkt die Tür des Brandraums durch den RG geöffnet wird. Dieser Zeitpunkt ist insofern wichtig, da er in der Analyse der Branddynamik einen Verzweigungspunkt darstellt, wobei die Tür mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wieder geschlossen wird, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aber auch fehlerhaft geöffnet bleiben kann, was sich auf die Brandentwicklung auswirkt.</p>
RG betrRaum RG U(3,3)	<p>Der RG betritt den Raum, wofür eine feste Zeit von 3 s angenommen wird.</p>
RG kontrRm -37 U(8,20)	<p>Befindet sich der RG im Brandraum, schätzt er die Rauchsituation im Brandraum ein. Für die Dauer, um die Situation einzuschätzen und zu einer Entscheidung zu gelangen, was zu tun ist, wird eine Zufallszeit zwischen 8 und 20 s geschätzt.</p> <p>Durch die Codierung -37 erhält das Programm die Information, dass der weitere Handlungsablauf von der Rauchentwicklung im Raum abhängt, die durch die Variable SmkRm beschrieben wird.</p> <p>SmkRm = 1 -> keine Rauchentwicklung im Raum sichtbar SmkRm = 2 -> Rauchentwicklung noch nicht so weit fortgeschritten, so dass der Raum betreten werden kann. SmkRm = 3 -> starke Rauchentwicklung, dass Raum verlassen werden muss</p> <p>(Die Belegung der Variablen SmkRm erfolgt im Eingabedatensatz 'CAAlarmList')</p>

- **HL 45** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 47 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 47) und
 - keine Rauchentwicklung im Raum sichtbar ist (bzw. durch SmkRm = 1)

Tab. 2.39 Beschreibung der Basishandlungen der HL 45

HL 45 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 47 und SmkRm = 1
RG BBFail -95 0	Da die Rauchentwicklung so schwach ist, erkennt der RG den Brand nicht und verlässt nach seiner Kontrolle den Raum. In diesem Fall findet keine Brandbekämpfung statt. Dies wird durch die Codierung -95 gekennzeichnet.

- **HL 49** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 47 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 47) und
 - die Rauchentwicklung im Brandraum noch nicht so weit fortgeschritten ist, so dass der RG den Raum betreten kann, um den Brandherd mit dem Handfeuerlöscher zu bekämpfen (bzw. durch SmkRm = 2).

Tab. 2.40 Beschreibung der Basishandlungen der HL 49

HL 49 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 47 und SmkRm = 2
RG wegHFL RG U(4, 10)	In diesem Fall wird angenommen, dass der RG sofort versuchen wird den beginnenden Brand mit dem HFL zu löschen, bevor er den SL informiert und sich der Brand weiter entwickeln kann. Der RG begibt sich zum nächst gelegenen Handfeuerlöscher (HFL). HFL befinden sich in größerer Anzahl in der Nähe des Raumes, so dass angenommen werden kann, dass die Löschung mit dem HFL unter diesen Bedingungen auf jeden Fall erfolgt. Die Zeit bis der BL den nächsten HFL erreicht wird zwischen 4 und 10 s geschätzt.
RG prepHFL RG U(8,18)	Der RG nimmt den HFL von der Halterung und bereitet ihn zur Löschung vor. Dafür wird eine Zufallszeit zwischen 8 und 18 s abgeschätzt. In den längeren Zeiten sind auch die Fälle eingeschlossen, in denen der RG einen anderen HFL nehmen muss.
RG wegTrBrd RG U(3,7)	Der RG begibt sich mit dem HFL zum Brandherd. Die dafür benötigte Zeit wird zwischen 3 und 7 s abgeschätzt.
RG startHFL -42 U(2,2)	Sobald der RG den Brandherd erreicht hat, beginnt er innerhalb 2 s mit dem Handfeuerlöscher den Brand zu bekämpfen. Dies wird durch die Codierung -42 gekennzeichnet.

- **HL 48** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 47 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 47) und
 - die Rauchentwicklung im Raum so groß ist, dass der RG den Raum nicht mehr betreten kann (bzw. durch SmkRm = 3).

Tab. 2.41 Beschreibung der Basishandlungen der HL 48

HL 48 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 47 und SmkRm = 3
RG TrZu -22 U(2,2)	Die Rauchentwicklung ist so groß, dass der RG die Tür sofort (innerhalb 2 s) wieder schließt.
RG wegTrTel RG U(2,6)	Der RG begibt sich daraufhin zum nächst gelegenen Telefon. Da sich Telefone in der Nähe des Brandraums befinden, wird eine relativ kurze Zeit zwischen 2 und 6 s angenommen, bis der RG das Telefon erreicht.
RG ruftSLan SL U(5,9)	Der RG nimmt den Telefonhörer ab und wählt die Nummer der Warte, wofür eine Zufallszeit zwischen 5 und 9 s abgeschätzt wird.
SL wegWrtTel SL U(5,15)	Der SL, der sich irgendwo in der Warte befindet geht zum Telefon. Da sich der SL mehr oder weniger weit entfernt vom Telefon befinden kann, wird für die Zeit bis er das Telefon erreicht eine Zufallszeit zwischen 5 und 15 s abgeschätzt.
SL spkRG RG U(1,1)	Der SL nimmt innerhalb 1 s den Telefonhörer ab und meldet sich. Obwohl diese Aktion aus der Sicht des Zeitbedarfs von 1 s vernachlässigbar ist, muss sie dennoch eingefügt werden, um die Verbindung zwischen SL und RG herzustellen.
RG infoBrand SL U(8,15)	Der RG informiert den SL darüber, dass im betreffenden Raum eine sehr starke Rauchentwicklung ist und er den Raum nicht betreten kann. Für die Zeitdauer der kurzen Information wird eine Zufallszeit zwischen 8 und 15 s angenommen.
SL AnwFLA RG U(4, 8)	Der SL weist den RG an, die Feuerlöschanlage (FLA) manuell zu aktivieren, da er infolge der Rauchentwicklung im Raum davon ausgeht, dass die automatische Auslösung der FLA ausgefallen ist. Für die Dauer der Anweisung werden zwischen 4 und 8 s angenommen.
RG wegTrFLA RG U(20,45)	Nachdem der RG die Anweisung vom SL entgegen genommen hat, begibt er sich zur Ventilstation der FLA, die sich auf der anderen Raumseite befindet. Dabei wird angenommen, dass die Motorarmatur nicht läuft, da die Automatik ausgefallen ist und deshalb die manuelle Auslösung nicht über den Steuerschrank für die Sprühwasserlöschanlage direkt vor der Tür vom Flur zum Brandraum erfolgen kann.

HL 48 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 47 und SmkRm = 3
	Für den Weg zur Ventilstation auf der anderen Raumseite wird eine Zufallszeit zwischen 20 und 45 s angenommen. Dabei wird der Situation Rechnung getragen, dass der RG aufgrund der Rauchentwicklung nicht durch den Raum gehen kann, sondern einmal um den Reaktor herum laufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen.
RG VentFLA RG U(60,80)	Am Ventil ist das Motorgetriebe ausgekuppelt. Das Ventil kann jedoch von Hand aufgefahren werden. Für die Zeitdauer, die der RG benötigt, das Ventil von Hand aufzufahren wird eine Zufallszeit zwischen 60 und 80 s geschätzt.
-125 bRelFLA * -125 0	Beim Versuch das Ventil von Hand aufzufahren besteht die Möglichkeit, dass die Absperrarmatur versehentlich zu stark verriegelt ist oder der RG das Ventil nicht von Hand aufbekommt. Damit kann die FLA ihre Funktion nicht erfüllen, ohne dass es an der Wasserversorgung liegt. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bRelFLA beschrieben. Es gilt: bRelFLA = 1 -> Ventil der FLA lässt sich manuell auffahren bRelFLA = 2 -> Ventil der FLA lässt sich nicht manuell öffnen.

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

Beschreibung der Handlungslisten in Abb. 2.7

Im Folgenden werden die spezifizierten Handlungslisten (HL) und die zugehörigen Basishandlungen beschrieben, die in Abb. 2.7 dargestellt sind.

- **HL 43** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 46 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 46) und
 - sich das Ventil der FLA manuell auffahren lässt (bzw. durch bRelFLA = 1)

Tab. 2.42 Beschreibung der Basishandlungen der HL 43

L 43 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 46 und bRelFLA = 1
RG startFLA -43 U(1,1)	Das Ventil der FLA konnte von RG manuell geöffnet werden und die FLA beginnt innerhalb 1 s, den Raum mit Wasser zu besprühen. Die Codierung -43 kennzeichnet den Beginn der Löschung durch die FLA, die durch den RG manuell aktiviert wurde.

- **HL 50** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 46 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 46) und
 - sich das Ventil der FLA nicht manuell auffahren lässt (bezeichnet durch bRelFLA = 2).

Tab. 2.43 Beschreibung der Basishandlungen der HL 50

HL 50 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 46 und bRelFLA = 2
SL pipELFW ELFW U(5,10)	Nachdem der SL in HL 46 vom RG über den Rauchaustritt informiert wurde und dem RG die Anweisung zur manuellen Auslösung der FLA gegeben hat, geht der SL zur Schaltstelle der Funkmeldeanlage und piepst den ELFW an, um den Brandalarm auszulösen. Für die Ausführung der Handlung wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 5 und 10 s abgeschätzt.
SL pipLG LG 0	Gleichzeitig mit dem ELFW wird die LG durch den SL angefunkelt. Dies geschieht durch zwei untereinander liegende Knöpfe. Da die LG gleichzeitig mit dem ELFW gerufen wird, werden 0 s für die Durchführung der Handlung angesetzt. Die Basishandlung muss trotzdem aufgeführt werden, da sie LG durch die Handlung die Information erhält, dass sie vom SL angefunkelt wird und wann dies geschieht. LG und ELFW erhalten über den Piepser bereits Basisinformationen über den Brandort, z. B. „Brand Kontrollbereich 1“.
SL wegLtspr SL U(4,10)	Zusätzlich zu Absetzen des Funkrufs, alarmiert der SL sowohl den Einsatzleiter der Feuerwehr (ELFW) als auch die beteiligten Personen der Löschgruppe (LG) über die Lautsprecheranlage. Dazu geht der SL zu dem Platz in der Warte, von dem aus er die Lautsprecherdurchsage absetzen kann. Zum Zurücklegen des Weges wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 4 und 10 s angenommen.
SL LtspELFW ELFW U(8,14)	Über die Lautsprecheranlage wird der ELFW durch wiederholte Durchsagen vom SL alarmiert. Es wird angenommen, dass die wiederholten Durchsagen des SL eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 8 und 14 s in Anspruch nehmen.
SL LtspLG LG 0	Gleichzeitig mit dem ELFW wird die LG vom SL über die Lautsprecheranlage alarmiert. Wegen der gleichzeitigen Alarmierung mit dem ELFW werden für die Durchführung dieser Basishandlung 0 s angesetzt. Da die LG durch die Lautsprecherdurchsage des SL alarmiert wird und darauf reagieren muss, muss die Situation als Basishandlung definiert werden.
ELFW hrtPiep ELFW U(4,10)	Es wird davon ausgegangen, dass der ELFW innerhalb kurzer Zeit entweder den Funkruf oder die Durchsage der Lautsprecherdurchsage hört. Dafür wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 4 und 10 s abgeschätzt.
ELFW IstInfo ELFW U(3,7)	Als Reaktion liest der ELFW entweder die Information auf seinem Funkmelder oder er reagiert nach einer gewissen Reaktionszeit auf die Lautsprecherdurchsage. Als Reaktionszeit bzw. Zeit um die Info auf dem Funkmelder zu lesen, wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 3 und 7 s angenommen.
ELFW	Nach der Reaktionszeit begibt sich der ELFW von seinem gegenwärtigen Standort zum nächsten erreichbaren Telefon. Da der Aufenthaltsort zum

HL 50 Basishandlung	Bedingung: ALld = 2 und HLcont = 46 und bReIFLA = 2
wegSiteTel ELFW U(15,60)	Zeitpunkt der Alarmierung nicht bekannt ist, muss die Situation berücksichtigt werden, dass das nächste erreichbare Telefon mehr oder weniger weit entfernt sein kann. Die Entfernung wirkt sich auf die Zeit aus, wie lange der ELFW benötigt, um das nächste Telefon zu erreichen. Um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, wird für die Zeit des ELFW, dass nächste Telefon zu erreichen, eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 15 und 60s abgeschätzt.
LG hrtPiep LG U(4,10)	Unabhängig vom ELFW registriert auch das Personal der LG den Funkruf oder die Lautsprecherdurchsage des SL innerhalb kurzer Zeit. Dazu wird analog zum ELFW auch für die LG eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 4 und 10 s geschätzt.
LG IstInfo LG U(3,7)	Das jeweilige Personal der LG liest die Information auf dem Funkmelder bzw. reagiert nach einer gewissen Reaktionszeit auf die Lautsprecherdurchsage. Dafür wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 3 und 7 s geschätzt.
LG wegKtrBer LG U(180,480)	Das jeweilige Personal der LG begibt sich nach der Alarmierung ohne Rückfrage sofort auf den Weg zum Kontrollbereich. Die LG setzt sich aus verschiedenen Personen zusammen, die sich bei der Alarmierung an unterschiedlichen Standorten befinden, die unterschiedlich weit vom Kontrollbereich entfernt sind. Um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, wird für den Zeitbedarf, bis sich eine Mindestzahl von Personen, die eine LG bilden können, am Eingang des Kontrollbereichs einfindet, eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 180 s und 480 s abgeschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Mehrheit der Personen der LG zum Kontrollbereich im richtigen Block begeben.
ELFW ruftWarte SL U(5,10)	Wenn der ELFW ein Telefon erreicht hat wählt er die Nummer der Warte, um den SL zu erreichen. Dazu wird eine Zeit zwischen 5 und 10 s angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass der ELFW die Nummer der Warte kennt bzw. die Warte über Kurzwahl zu erreichen ist.
SL nmtTelhr SL U(4,7)	Der SL hört den Anruf und nimmt den Telefonhörer ab. Dafür wird eine Zufallszeit zwischen 4 und 7 s abgeschätzt. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass sich der SL, der kurz vorher den Brandalarm ausgelöst hat und den Rückruf des ELFW erwartet, sich in der Nähe des Telefons befindet.
SL AnwELFW ELFW U(20,30)	Der SL beschreibt dem ELFW die Situation und bespricht mit ihm kurz die weiteren Maßnahmen. Dabei wird angenommen, dass die Informationen an den ELFW etwas komplexer sind als die Anweisungen an den RG, wodurch das Gespräch etwas länger dauern wird. Für die Dauer des Gesprächs wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 20 und 30 s abgeschätzt.
ELFW wegKtrBer ELFW U(20,300)	Nach dem Gespräch mit dem SL begibt sich der ELFW zum Kontrollbereich, der vom aktuellen Standort des ELFW unterschiedlich weit entfernt sein kann. Zur Berücksichtigung dieser Unsicherheit wird für den Weg, den der ELFW bis zum Kontrollbereich zurücklegt, eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 20 und 300 s angenommen.
-122 bELBik * -122 0	Nachdem der ELFW seine Anweisungen vom SL bekommen hat, hängt der weitere Ablauf von der zufallsbedingten Situation ab, ob sich der ELFW zum Kontrollbereich im richtigen Block begibt oder sich durch Missverständnisse in der Kommunikation mit dem SL zum Kontrollbereich im falschen Block begibt. Dies wird durch die Variable bELBik ausgedrückt. Es gilt: bELBik = 1 -> ELFW begibt sich zum Kontrollbereich im richtigen Block bELBik = 2 -> ELFW begibt sich zum Kontrollbereich im falschen Block

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103

- **HL 51** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 50 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 50) und
 - sich der ELFW zum Kontrollbereich im richtigen Block begibt, nachdem er die Anweisung vom SL bekommen hat (bzw. durch bELBlk = 1).

Tab. 2.44 Beschreibung der Basishandlungen der HL 51

HL 51 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 50 und bELBlk = 1
LG vorbArb LG U(240,360)	Die Personen der LG, die nach einer gewissen Zeit am Kontrollbereich ankommen, beginnen mit den vorbereitenden Arbeiten. Dies geschieht unabhängig davon, ob der ELFW bereits anwesend ist und auf die LG gewartet hat oder noch nicht am Kontrollbereich angekommen ist. Für die vorbereitenden Arbeiten wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 240 und 360 s abgeschätzt.
-4 Zeitvgl4 -4 0	LG und ELFW begeben sich unabhängig voneinander auf den Weg zum Kontrollbereich. Wenn die LG vor dem ELFW am Kontrollbereich ankommt, beginnt sie mit ihren vorbereitenden Arbeiten. Ist die LG mit ihren vorbereitenden Arbeiten fertig und der ELFW noch nicht am Eingang des Kontrollbereichs angekommen, begibt sich die LG ohne den ELFW zum Brandraum. Wenn der ELFW vor der LG am Kontrollbereich ankommt, muss er auf die Leute der LG warten, damit sie sich zusammen auf den Weg zum Brandraum begeben können. Zu diesem Zweck wird an dieser Stelle ein Zeitvergleich durchgeführt. Der Zeitvergleich 'Zeitvgl4' mit der Codierung -4 überprüft, ob der ELFW vor der LG am Kontrollbereich ankommt. In diesem Fall wird die Wartezeit des ELFW automatisch hochgezählt, bis die LG am Kontrollbereich ankommt.
-128 bLGerrRaum * -128 0	Wenn die LG ihre vorbereitenden Arbeiten am Eingang des Kontrollbereichs abgeschlossen hat, begibt sie sich entweder mit oder ohne ELFW auf den Weg zum Brandraum. Hierbei wird berücksichtigt, dass aufgrund fehlerhafter bzw. missverständlicher Anweisung oder Gruppenkommunikation irrtümlich ein falscher Raum aufgesucht werden kann. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob sich die LG zum richtigen Brandraum begibt oder einen falschen Raum aufsucht. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bLGerrRm beschrieben. Es gilt: bLGerrRm = 1 -> LG geht zum richtigen Raum bLGerrRm = 2 -> LG geht irrtümlich zu einem falschen Raum

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103: Die aleatorische Unsicherheit der Variablen bLGerrRm und die zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

- **HL 52** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 50 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 50) und

- sich der ELFW fälschlicherweise zum Kontrollbereich im falschen Block begibt, nachdem er die Anweisung vom SL bekommen hat (bezeichnet durch bELBlk = 2).

Tab. 2.45 Beschreibung der Basishandlungen der HL 52

HL 52 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 50 und bELBlk = 2
ELFW wegfBlk ELFW U(200,300)	Der ELFW geht irrtümlich zum Kontrollbereich im falschen Block. Es wird angenommen, dass er den Fehler innerhalb einer gewissen Zeit selber bemerkt und sich dann unverzüglich zum Kontrollbereich in den richtigen Block begibt. Dies resultiert in einer Zeitverzögerung, für die eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 200 und 300 s angenommen wird.
LG vorbArb LG U(240,360)	Die Personen der LG, die nach einer gewissen Zeit am Kontrollbereich ankommen, beginnen mit den vorbereitenden Arbeiten. Dies geschieht unabhängig davon, ob der ELFW bereits anwesend ist und auf die LG gewartet hat oder noch nicht am Kontrollbereich angekommen ist. Für die vorbereitenden Arbeiten wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 240 und 360 s abgeschätzt.
-4 Zeitvgl4 -4 0	LG und ELFW begeben sich unabhängig voneinander auf den Weg zum Kontrollbereich. Wenn die LG vor dem ELFW am Kontrollbereich ankommt, beginnt sie mit ihren vorbereitenden Arbeiten. Ist die LG mit ihren vorbereitenden Arbeiten fertig und der ELFW noch nicht am Eingang des Kontrollbereichs angekommen, begibt sich die LG ohne den ELFW zum Brandraum. Wenn der ELFW vor der LG am Kontrollbereich ankommt, muss er auf die Leute der LG warten, damit sie sich zusammen auf den Weg zum Brandraum begeben können. Zu diesem Zweck wird an dieser Stelle ein Zeitvergleich durchgeführt. Der Zeitvergleich 'Zeitvgl4' mit der Codierung -4 überprüft, ob der ELFW vor der LG am Kontrollbereich ankommt. In diesem Fall wird die Wartezeit des ELFW automatisch hochgezählt, bis die LG am Kontrollbereich ankommt.
-128 bLGerrRaum * -128 0	Wenn die LG ihre vorbereitenden Arbeiten am Eingang des Kontrollbereichs abgeschlossen hat, begibt sie sich entweder mit oder ohne ELFW auf den Weg zum Brandraum. Hierbei wird berücksichtigt, dass aufgrund fehlerhafter bzw. missverständlicher Anweisung oder Gruppenkommunikation irrtümlich ein falscher Raum aufgesucht werden kann. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob sich die LG zum richtigen Brandraum begibt oder einen falschen Raum aufsucht. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable bLGerrRm beschrieben. Es gilt: bLGerrRm = 1 -> LG geht zum richtigen Raum bLGerrRm = 2 -> LG geht irrtümlich zu einem falschen Raum

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103: Die aleatorische Unsicherheit der Variablen bLGerrRm und die zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

- **HL 53** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 51 oder die HL 52 gewesen ist (bzw. durch $HLcont \geq 51$ und $HLcont \leq 52$) und

- sich die LG zum richtigen Raum begibt, nachdem sie vom SL alarmiert worden ist (bezeichnet durch $bLGerrRm = 1$).

Tab. 2.46 Beschreibung der Basishandlungen der HL 53

HL 53 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont \geq 51 und HLcont \leq 52 und bLGerrRm = 1
LG wegRm LG U(45,75)	Die LG begibt sich vom Eingang des Kontrollbereichs zum Brandraum. Da sich der Brandraum nicht sehr weit vom Eingang des Kontrollbereichs befindet, wird für den Weg eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 45 und 75 s abgeschätzt, bis die Personen der LG am Brandraum ankommen.
LG scnTr -36 U(4,8)	Wenn sich die LG dem Brandraum nähert, nimmt sie eine kurze Inspektion der Tür vor und erhält vom RG die Information, dass er die FLA nicht manuell aktivieren konnte. Dies geschieht in einer relativ kurzen Zeit zwischen 4 und 8 s.

- **HL 54** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 51 oder die HL 52 gewesen ist (bzw. durch $HLcont \geq 51$ und $HLcont \leq 52$) und
 - sich die LG aufgrund von Missverständnissen zu einem falschen Raum begibt, (bezeichnet durch $bLGerrRm = 2$).

Tab. 2.47 Beschreibung der Basishandlungen der HL 54

HL 54 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont \geq 51 und HLcont \leq 52 und bLGerrRm = 2
LG wegKorRm LG U(300,600)	Die LG geht vom Eingang des Kontrollbereichs zu einem falschen Raum irgendwo innerhalb des Kontrollbereichs. Wenn die LG am Raum angekommen ist und keinen Brand bemerkt, wird sie den SL benachrichtigen, der der LG eine korrigierte Anweisung gibt. Darauf begibt sich die LG zum richtigen Brandraum. Für diesen Aktionsblock, in dem mehrere Basishandlungen zusammengefasst sind, wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 300 und 600 s abgeschätzt. An der Handlung 'wegKorRm' wird demonstriert, dass die Modellierungstiefe einer Handlung sehr flexibel gestaltet werden kann. Diese Aktion, die relativ grob modelliert wurde, könnte detaillierter in weitere Basishandlungen zerlegt werden. Mit dem Crew-Modul ist es relativ einfach möglich, dass man ausgehend von einer groben Modellierungsstruktur, komplexere Aktionen in Basishandlungen zerlegt und eine detaillierte Modellierung des Handlungsablaufs erhält.
LG scnTr -36 U(4,8)	Wenn sich die LG dem Brandraum nähert, nimmt sie eine kurze Inspektion der Tür vor und erhält vom RG die Information, dass er die FLA nicht manuell aktivieren konnte. Dies geschieht in einer relativ kurzen Zeit zwischen 4 und 8 s.

Beschreibung der Handlungslisten in Abb. 2.8

Im Folgenden werden die spezifizierten Handlungslisten (HL) und die zugehörigen Basishandlungen beschrieben, die in Abb. 2.8 dargestellt sind.

- **HL 61** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 53 oder die HL 54 gewesen ist (bzw. durch $HLcont \geq 53$ und $HLcont \leq 54$) und
 - und Rauchaustritt unter der Tür des Brandraums sichtbar ist (bezeichnet durch $SmkTr = 2$).

Tab. 2.48 Beschreibung der Basishandlungen der HL 61

HL 61 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont \geq 53 und HLcont \leq 54 und SmkTr = 2
RG infFLA LG U(5,30)	Da die FLA vom RG nicht manuell aktiviert werden konnte, wartet er bis die LG eintrifft. Wenn die LG am Brandraum eintrifft, informiert der RG die LG, dass sich das Ventil der FLA nicht manuell öffnen lässt. Für die Kommunikation wird eine Zufallszeit zwischen 5 und 30 s angenommen.
LG nmtSchl LG U(15,30)	Da die LG, dass sich die FLA nicht manuell aktivieren lässt, legt sie den Schlauch zur Löschung aus und schließt sie an den Wasseranschluss an. Für diese Arbeiten wird eine Zufallszeit zwischen 15 und 30 s abgeschätzt.
LG AtemschnAnl LG U(4,10)	Da die Rauchentwicklung im Raum sich bereits stark entwickelt hat, legt die Mannschaft der LG ihre Pressluftatemgeräte an. Dafür wird eine Zeit zwischen 4 und 10 s angenommen.
LG inPos LG U(3,6)	Danach begeben sich die Personen der LG mit ihrem Löschgerät in die Position, um die Löschung so schnell wie möglich beginnen zu können. Für diese Aktion werden zwischen 3 und 6 s zugrunde gelegt.
-129 bRelLöAusr * -129 0	Der weitere Handlungsablauf hängt von der Zuverlässigkeit der Lösch-ausrüstung ab. Beim Einsatz der Lösch-ausrüstung kann die zufallsbedingte Situation eintreten, dass der Wasseranschluss oder der Schlauch defekt ist, so dass ein Ersatzschlauch oder ein anderer Wasseranschluss benötigt wird. Eine weitere zufällige Situation kann darin bestehen, dass das Löschwassersystem ausfällt und das Löschwasser von anderer Stelle her besorgt werden muss. Die zufälligen Situationen, die die Zuverlässigkeit der Lösch-ausrüstung betreffen werden durch die Variable bRelLöAusr beschrieben durch: bRelLöAusr = 1 -> Lösch-ausrüstung verfügbar bRelLöAusr = 2 -> Anschluss oder Schlauch defekt bRelLöAusr = 3 -> unvorhergesehene Ereignisse eintreten, die längere Recovery-Aktionen zur Folge haben

* siehe Anmerkung zu Handlungsliste HL 103. Die aleatorische Unsicherheit der Variablen bRelLöAusr und die zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

- **HL 55** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 61 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 61) und
 - die Löschausrüstung der LG verfügbar ist (bzw. durch bRelLöAusr = 1).

Tab. 2.49 Beschreibung der Basishandlungen der HL 55

HL 55 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 61 und bRelLöAusr = 1
LG TrAuf -21 U(2,2)	Die LG hat sich mit der Löschausrüstung in die Löschposition gebracht und öffnet die Tür des Brandraums. Für das Öffnen der Tür wird eine Zeitdauer von 2 s angenommen. Die Codierung -21 teilt dem Programm mit, dass zu diesem Zeitpunkt die Tür des Brandraums durch die Feuerwehr geöffnet wird.
LG 3SprSt LG U(25,40)	Da bereits Rauch unter der Tür sichtbar war bzw. die Rauchentwicklung im Raum relativ weit fortgeschritten ist, führt die LG mit ihrer Löschausrüstung 3 Sprühstöße von der Tür in den Brandraum durch. Für die benötigte Zeit zur Durchführung der 3 Sprühstöße werden zwischen 25 und 40 s abgeschätzt.
LG WrmBildCam LG U(10,20)	Nach dem Absetzen der 3 Sprühstöße wird davon ausgegangen, dass die Sicht im Raum so schlecht ist, dass die Wärmebildkamera eingesetzt wird, um den Brandherd möglichst schnell lokalisieren zu können. Deshalb holt sich die LG die Wärmebildkamera und bereitet sie für den Einsatz vor. Dafür wird eine Zeitdauer zwischen 10 und 20 s abgeschätzt.
LG angrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt den Raum und lokalisiert mit Hilfe der Wärmebildkamera den Brandherd. Die Zeitdauer, die die LG bis zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt wird zwischen 15 und 30 s geschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (1 s) die gezielte Löschung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

- **HL 56** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 61 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 61) und
 - der Wasseranschluss oder der Schlauch der Löschausrüstung defekt ist (bzw. durch bRelLöAusr = 2).

Tab. 2.50 Beschreibung der Basishandlungen der HL 56

HL 56 Basishandlung	Bedingung: ALId = 2 und HLcont = 61 und bRelLöAusr = 2
LG recover1 LG U(60,300)	In diesem Fall wird die LG versuchen, einen anderen Wasseranschluss zu finden bzw. einen Ersatzschlauch zu besorgen. Für diese Recovery-Aktionen wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 60 und 300 s abgeschätzt.
LG TrAuf -21 U(2,2)	Nach dieser Recovery-Aktion öffnet das Personal der LG die Tür des Brandraums. Für das Öffnen der Tür wird eine Zeitdauer von 2 s angenommen. Die Codierung -21 teilt dem Programm mit, dass zu diesem Zeitpunkt die Tür des Brandraums durch die Feuerwehr geöffnet wird.
LG 3SprSt LG U(25,40)	Da bereits Rauch unter der Tür sichtbar war bzw. die Rauchentwicklung im Raum relativ weit fortgeschritten ist, führt die LG mit ihrer Löschausrüstung 3 Sprühstöße von der Tür in den Brandraum durch. Für die benötigte Zeit zur Durchführung der 3 Sprühstöße werden zwischen 25 und 40 s abgeschätzt.
LG WrmBildCam LG U(10,20)	Nach dem Absetzen der 3 Sprühstöße wird davon ausgegangen, dass die Sicht im Raum so schlecht ist, dass die Wärmebildkamera eingesetzt wird, um den Brandherd möglichst schnell lokalisieren zu können. Deshalb holt sich die LG die Wärmebildkamera und bereitet sie für den Einsatz vor. Dafür wird eine Zeitdauer zwischen 10 und 20 s abgeschätzt.
LG angrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt den Raum und lokalisiert mit Hilfe der Wärmebildkamera den Brandherd. Die Zeitdauer, die die LG bis zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt wird zwischen 15 und 30 s geschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (1 s) die gezielte Löschung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

- **HL 57** wird unter der Bedingung aktiviert, dass:
 - ALId = 1 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 61 gewesen ist (bzw. durch HLcont = 61) und

unvorhergesehene Ereignisse eintreten, die längere Recovery-Aktionen zur Folge haben, z. B. Ausfall des Löschwassersystems (bzw. durch bRelLöAusr = 3).

Tab. 2.51 Beschreibung der Basishandlungen der HL 57

HL 57 Basishandlung	Bedingung 1: ALId = 1 und HLcont = 61 und bRelLöAusr = 3
LG Recover2 LG U(1000,1800)	Durch unvorhergesehene Ereignisse, wie z. B. den Ausfall des Löschwassersystems, versucht das Personal der LG über Recovery-Aktionen die Brandbekämpfung Lös chung des Brandes durchzuführen. Für diese Recovery-Aktion wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 1000 und 1800 s abgeschätzt.
LG TrAuf -21 U(2,2)	Wenn die Wasserversorgung für die Löschung von anderer Stelle hergestellt ist, öffnet das Personal der LG die Tür des Brandraums. Für das Öffnen der Tür wird eine Zeitdauer von 2 s angenommen. Die Codierung -21 teilt dem Programm mit, dass zu diesem Zeitpunkt die Tür des Brandraums durch die Feuerwehr geöffnet wird.
LG 3SprSt LG U(25,40)	Da bereits Rauch unter der Tür sichtbar war bzw. die Rauchentwicklung im Raum relativ weit fortgeschritten ist, führt die LG mit ihrer Löschausrüstung 3 Sprühstöße von der Tür in den Brandraum durch. Für die benötigte Zeit zur Durchführung der 3 Sprühstöße werden zwischen 25 und 40 s abgeschätzt.
LG WrmBildCam LG U(10,20)	Nach dem Absetzen der 3 Sprühstöße wird davon ausgegangen, dass die Sicht im Raum so schlecht ist, dass die Wärmebildkamera eingesetzt wird, um den Brandherd möglichst schnell lokalisieren zu können. Deshalb holt sich die LG die Wärmebildkamera und bereitet sie für den Einsatz vor. Dafür wird eine Zeitdauer zwischen 10 und 20 s abgeschätzt.
LG angrBrd LG U(15,30)	Die LG betritt den Raum und lokalisiert mit Hilfe der Wärmebildkamera den Brandherd. Die Zeitdauer, die die LG bis zur Lokalisierung des Brandherdes benötigt wird zwischen 15 und 30 s geschätzt.
LG startBB -45 U(1,1)	Nachdem der Brandherd lokalisiert ist, beginnt sofort (1 s) die gezielte Lös chung des Brandes. Durch die Codierung -45 wird dem Programm mitgeteilt, dass zu diesem Zeitpunkt die LG die Brandbekämpfung mit ihrer Löschausrüstung beginnt.

3 Modell zur Branddynamik

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Gründe zur Auswahl des Brandraums geführt haben und es wird eine Beschreibung des Brandraums und des Brandszenarios geliefert, die modelliert werden sollen. Dies erfolgt in Abschnitt 3.1.1. Des Weiteren wird in Abschnitt 3.1.2 erläutert, wie Brandraum und Brandszenario unter Verwendung des Rechenprogramms FDS modelliert worden sind. In Abschnitt 3.2 werden sowohl die aleatorischen als auch die epistemischen Unsicherheiten beschrieben, die in der MCDET-Analyse zur Branddynamik berücksichtigt werden.

3.1 Beschreibung des Brandszenarios

3.1.1 Raumauswahl und Szenario

Das Simulationsbeispiel hat einerseits die angestrebten methodischen Weiterentwicklungen zu unterstützen und soll andererseits auch die Leistungsfähigkeit der probabilistischen Dynamik unter Verwendung der MCDET-Methode aufzeigen. Die fortschrittliche Methode soll im Rahmen probabilistischer Bewertungen von Brandereignissen in kerntechnischen Anlagen eingesetzt werden, bei denen die bisher angewendeten konventionellen PSA-Methoden nicht ausreichen, um die komplexen Wechselwirkungen der dabei wirksamen Einflussgrößen adäquat zu modellieren und zu analysieren. Bei der Auswahl des Brandraums in der Referenzanlage ist somit darauf zu achten, dass

- Merkmale vorliegen, die typisch sind für den Anwendungsbereich der neuen Methode. Hierzu gehören u. a. hohe Brandlast mit dynamischem Verhalten des Brandprozesses, den Brandverlauf beeinflussende aleatorische Parameter (Zuverlässigkeit der Brandmelde- und Löschanlage, Möglichkeit einer Sauerstoffzufuhr über Lüftungsanlage und Brandschutztüren, Dauer sowie Erfolg oder Misserfolg von Handlungen des Personals, Verfügbarkeit der Lüftungsabschlusses des Brandraums) und zu schützende Komponenten mit unterschiedlicher Widerstandsfähigkeit gegen die Brandwirkungen und
- sicherheitsrelevante, in einer PSA zu untersuchende Ereignisabläufe entstehen könnten, wenn der Brand nicht rechtzeitig gelöscht wird. Dies ist u. a. der Fall, wenn sich im Brandraum oder in daran angrenzenden Räumen sicherheitstechnisch relevante Komponenten (wie Kabel oder elektrische Komponenten, Armaturen, Pumpen etc.) befinden, die durch den Brand oder seine Folgeprodukte, wie

Ruß, geschädigt werden. Diese werden als Targets bezeichnet.

Hinweis: Im Referenzraum wurden solche PSA-relevanten Targets nicht vorgefunden. Stattdessen wurde im Modell davon ausgegangen, dass relevante Kabel im Brandraum vorhanden seien.

Zur Auswahl des Brandraums wurden eine bereits vorliegende Brand-PSA für die ausgewählte Referenzanlage, die Systembeschreibungen und Systemschaltpläne, Schnittzeichnungen, Rohrleitungspläne und Informationen aus einer Begehung von vorausgewählten Räumen der Referenzanlage herangezogen. Schließlich wurde der Ölversorgungsraum (siehe Abb. 3.1) im Reaktorgebäude auf der Ebene - 6,50 m ausgewählt. Der Raum der Abmessungen von ca. 7,40 m x 6,2 m x 6,00 m Höhe ist über drei Brandschutztüren begehbar, von denen eine Tür über ein kurzes Wegstück Montage/Bedienflur in das Haupttreppenhaus führt. Im Bereich der Außenseite der Tür lässt sich die Löschanlage von Hand auslösen; ferner ist ein Telefon vorhanden. Eine zweite, doppelflügelige Brandschutztür führt in einen Anlagenraum mit Komponenten des Kernsprühsystems, in dem sich auch die Fernschaltarmatur der Löschanlage befindet. Die dritte Tür führt in einen Rohrleitungsschacht.

In dem ausgewählten Raum befindet sich das Ölversorgungssystem der Zwangsumwälzpumpen, die das Reaktorkühlmittel umwälzen. Das Ölversorgungssystem besteht im Wesentlichen aus den drei Ölförderpumpen, die das Schmieröl aus dem Ölvorratsbehälter über die Ölkühler und ÖlfILTER zu den Zwangsumwälzpumpen im Steuerstabsantriebsraum fördern. In den Raum ist eine Stahlebene eingebaut, die über eine Stahltreppe begangen werden kann. Auf der zweiten Ebene des Raums befindet sich noch ein weiterer Behälter in dem Leckageöl gesammelt wird. Ferner befindet sich eine elektrische Ölheizung, mit der das Öl beim Anfahren auf Betriebstemperatur gebracht wird.

In diesem Raum befinden sich somit sowohl eine erhebliche Ölbrandlast als auch potentielle Zündquellen (z. B. durchlaufende elektrische Antriebe und die Heizung). Der Raum ist mit acht Ionisationsrauchmeldern ausgestattet, von denen sich je vier an der Decke des Raums bzw. der Decke der Stahlbühne befinden. Die Brandmelder sind auf die Meldeanlage aufgeschaltet. Wegen der vorhandenen Ölbrandlasten verfügt der Raum über eine Sprühwasserlöschanlage, die automatisch über die Brandmeldeanlage ausgelöst wird. Die Sprühwasserlöschanlage wird über die Löschwasserversorgung des Kraftwerks gespeist. Die Auslösung erfolgt über eine Fernschaltarmatur, die automatisch durch die Brandmeldeanlage/Löschsteuerzentrale, über Handtaster vom

Hauptzugang zum Ölversorgungsraum oder von der Warte auszulösen ist. Nach der Auslösung verfährt ein Elektromotor das Fernschaltventil. Bei Ausfall der Motorbetätigung kann der Motor ausgerastet und das Ventil von Hand aufgefahren werden. Das zu Prüfzwecken vorhandene Freischaltventil der Löschanlage ist in Offenstellung gesichert.

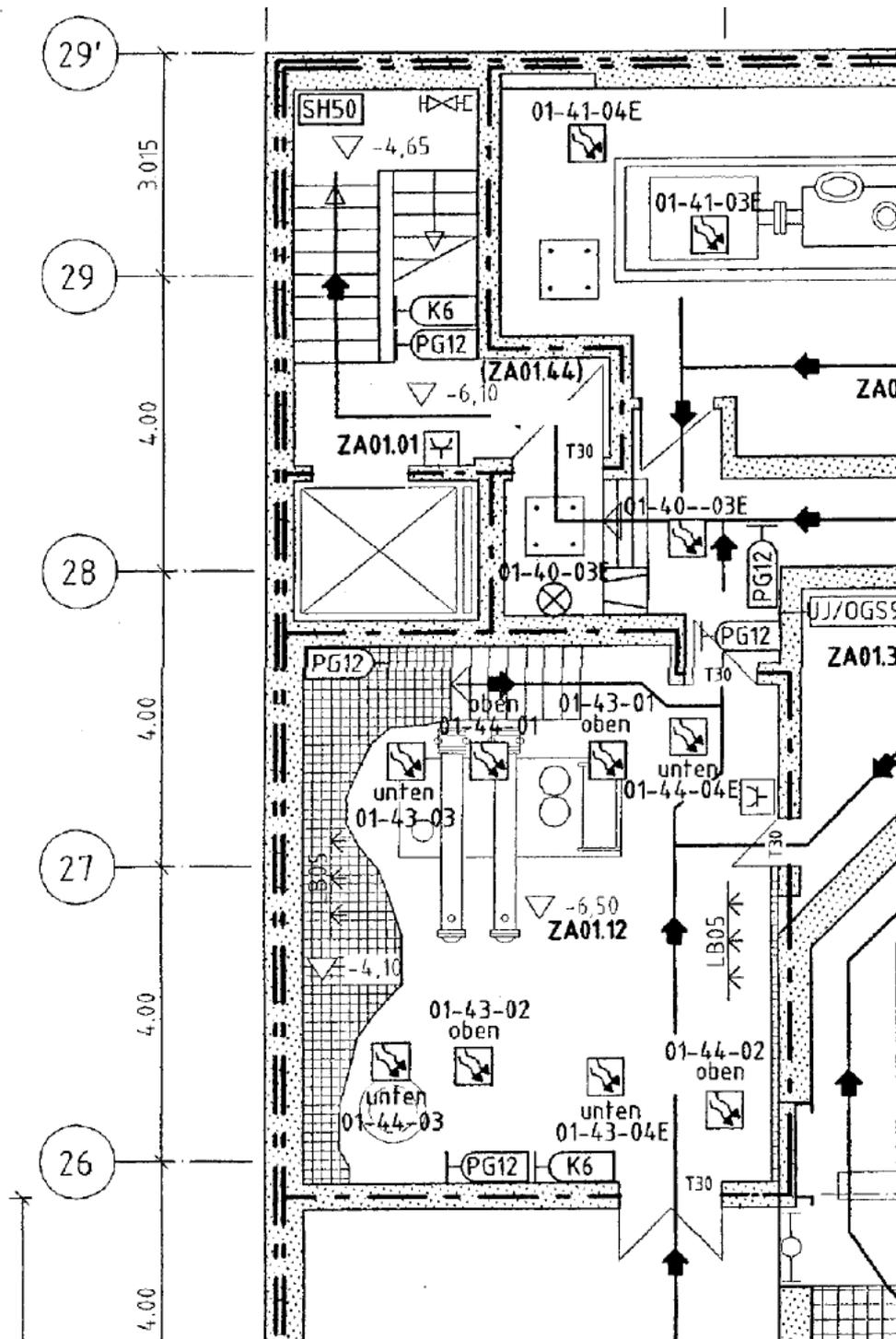


Abb. 3.1 Ausschnitt aus dem Brandschutzplan der Referenzanlage mit dem Ölversorgungsraum

Die Löschanlage ist so ausgelegt, dass ein Brand in der Entstehungsphase schnell unterdrückt werden kann und sich die Temperatur in der Heißgasschicht des Brandraums schnell unter 100 °C abkühlen wird. Neben der Löschanlage befinden sich im Raum drei Feuerlöscher, davon zwei mit jeweils 12 kg Löschpulver sowie einer mit 6 kg Kohlendioxid. Weitere Feuerlöscher befinden sich in den Nachbarräumen und sind im Anforderungsfall schnell herbeizubringen. Der nächstgelegene Wandhydrant befindet sich im über den Montageflur gut erreichbaren Treppenhaus. Der Hydrant verfügt über die Möglichkeit einer Schaumzumischung.

Neben einer Reihe von Kabeln befinden sich auf der zweiten Ebene des Brandraums (offener Zugang über Treppe) noch Rohrleitungsabschnitte von Systemen zur Not- und Nachkühlung des Reaktors und der Kondensationskammer. Die Rohrleitungsstränge sind flächendeckend, mit Ausnahme der Auslassungen für die Rohrleitungshalterungen, mit einer Isolierung aus Mineralwolle gedämmt, die sich hinter einer Blechverkleidung befindet. Ausgehend von einer Isolierstärke von mindestens $d = 0,03$ m und einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,04$ W m⁻¹ K⁻¹ für Mineralwolle ist der Wärmedurchgang pro Fläche bei durchschnittlichen Kabeln der Elektro- und Leittechnik ($d = 0,0015$ m, $\lambda = 0,2$ W m⁻¹ K⁻¹) um mindestens 100-mal höher als der Durchgang auf die Stahlrohraußenfläche. Zusätzlich treten bei der Aufheizung des Wassers Wärmeverluste durch Wärmeleitung in Nachbarräume und Naturkonvektion des Wassers auf. Eine signifikante Erwärmung des Wassers kann überdies nur auftreten, wenn das Rohrleitungsstück auf ganzer Länge erwärmt wird, während ein Kabelausfall bei punktueller Erwärmung, z. B. durch die Flammenzone, auftritt. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit auf eine nähere Betrachtung der Aufheizung des Wassers in den Rohrleitungen verzichtet. Für die Leittechnikabel wird entsprechend des Modells 'Thermally Induced Electrical Cable Failure' (THIEF) /MCG 13/ angenommen, dass die Innentemperatur der Kabelmantelisolierung das entscheidende Kriterium für einen Kabelausfall ist. Im Post-Processing wird das auf der Maximaltemperatur basierende Modell auf den zeitlichen Einfluss erweitert (siehe Abschnitt 4.3).

Folgende thermophysikalische Parameter einschließlich ihrer Unsicherheiten wurden in den Simulationen für die Kabel verwendet:

- Leitfähigkeit: 0,2 W/(m*K),
- Kabelmanteldicke: 0,0015 bis 0,002 m gleichverteilt,
- Kabelmanteldichte: 1190 kg/m³ +/- 20 % gleichverteilt,

- spezifische Wärmekapazität des Kabelmantels: 1,04 bis 1,50 kJ/(kg*K) gleichverteilt.

Für die Brandsimulation wurde davon ausgegangen, dass sich derartige Kabel im Bereich des Brandentstehungsortes unterhalb der Decke befinden.

Der Brandraum ist an das nukleare Lüftungssystem der Anlage angeschlossen. Der nominale Luftwechsel für den Raum beträgt 800 m³/h, die über den Zuluftkanal eingeblasen und über den Abluftkanal abgeführt werden. Die Zuluft wird über je eine Öffnung in die untere und obere Ebene eingeblasen. Die obere Zuluftöffnung ist dabei etwas oberhalb des Ölvorwärmers angeordnet. Zwei Abluftöffnungen sind an einer Wandseite unterhalb der Decke angeordnet. Zu- und Abluftkanal sind mit je einer Brandschutzklappe (BSK) in Wandeinbau absperrbar, die über ein Schmelzlot mit der Auslegungstemperatur von 72 °C selbsttätig schließen. Eine Fernauslösung der Brandschutzklappe ist nicht vorhanden.

Es wird konservativ davon ausgegangen, dass der Überdruck im Brandraum nicht zu einem derartigen Rückstrom in der Zuluftleitung führt, dass die Brandschutzklappe in der Zuluft schließen würde. Das Schließen der Abluft-Brandschutzklappe wird aber durch Temperaturmessstellen an beiden Abzugsöffnungen modelliert, die bei 72 °C mit einem RTI (*Response Time Index*) Wert zwischen 50 und 200 (m s)^{0,5} (gleichverteilt) auslösen. Für das Schließen der Brandschutzklappe wird konservativ eine zwei-von-zwei-Auswahl der Temperaturmessstellen getroffen. Für die Versagenswahrscheinlichkeit der Abluft-Brandschutzklappe (d. h. Abluft-Brandschutzklappe bleibt bei Anforderung fehlerhaft auf) wurde ein Referenzwert von 0,01 zugrunde gelegt (siehe Abschnitt 3.2).

Da die Arbeitskennlinien (d. h. der Luftvolumenstrom in Abhängigkeit des Druckverlusts) der Lüftungsanlage der Referenzanlage nicht bekannt sind, wird konservativ davon ausgegangen, dass der Zuluftvolumenstrom beim Schließen der Abluft-Brandschutzklappe nur auf die Hälfte des Nenn-Volumenstroms fällt. Im Modell wird die Abluft dann über Leckagen an der Schwelle der beiden Brandschutztüren aus dem Brandraum geblasen, um große, in der Realität unrealistische Brandraumdrücke, zu vermeiden. Unrealistisch hohe Brandraumdrücke können zu Instabilitäten im Rechenprogramm führen.

Als Brandszenario wurde das Versagen eines elektrischen Ölvorwärmers im Referenzraum angenommen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es zu einem Austritt von Öl und zu einer Entzündung des austretenden Öls kommt, so dass die Freisetzungsrate der Pyrolyserate des Öls entspricht. Für das Szenario wird konservativ keine Schwelbrandphase angenommen.

Die Unsicherheit über den Verlauf der Freisetzungs-/Pyrolyserate des Öls wird über einen stochastischen, linearen Anstieg der Pyrolyserate wiedergegeben. Die Pyrolyserate steigt von Null zu Beginn der Simulation linear auf einen Maximalwert, der einer idealen Wärmefreisetzungsrate von 600 kW entspricht. Dieser Maximalwert wurde nach 150 s bis maximal 600 s (gleichverteilt) erreicht. Zum Vergleich: Der nach Schließen der Brandschutzklappe vorhandene Zuluftvolumenstrom von 400 m³/h, entsprechend 0,235 kg/s Luft bzw. 0,031 kg/s Sauerstoff, erlaubt bei theoretisch vollständiger Ausnutzung des Sauerstoffangebots eine maximaler Wärmefreisetzung von 400 kW. Der vorgegebene Verlauf der Pyrolyserate führt früher oder später realistischer Weise zu unterventilierten Bränden. Bei Nichtschließen der Abluft-Brandschutzklappe (Zuluftvolumenstrom bleibt unreduziert bei 800 m³/h) kommt es bei maximaler Pyrolyserate ebenfalls nicht zu einer vollständigen Beteiligung an der Reaktion, da auf Grund der Mischungsverhältnisse und Temperaturen im Brandraum durch das Löschungskriterium in FDS die Verbrennungsreaktion lokal gestoppt wird.

Die Pyrolysegase werden über eine Fläche (Lachenfläche) von 0,6 m² freigesetzt. Die Pyrolysegase werden als C₁₂H₂₄-Molekül modelliert, die Ausbeute an Ruß beträgt 0,097 +/- 0,02 kg/kg (gleichverteilt.). Die Kohlenmonoxidausbeute beträgt 0,02 kg/kg. Der effektive Heizwert wurde von FDS zu ca. 41230 kJ/kg (abhängig von der Rußausbeute) berechnet.

In Abhängigkeit von der Wechselwirkung zwischen stochastischen Parametern und Branddynamik bietet sich dem Anlagenpersonal (Anlagenrundgänger, Brandläufer, Löschtrupp der Feuerwehr) eine Reihe von Möglichkeiten, den Brand zu löschen bevor weitere sicherheitsrelevante Folgen eintreten.

Im zeitlichen Ablauf der Brandentwicklung können alle Zwangsumwälzpumpen ausfallen. Die Reaktorleistung sinkt erheblich ab mit den möglichen Folgen 'Füllstandsanstieg im RDB', 'Temperatur-/Druckabfallabfall' und ggf. RESA (Reaktorschnellabschaltung). Eine Nachrechnung mit dem Analysesimulator ergab, dass es bei voll

funktionsfähigen Regeleinrichtungen nicht zur RESA kommt. Fällt auch noch die Umleitstation aus, so liegt ein für die PSA relevantes auslösendes Ereignis vor.

Im Brandraum befinden sich Rohrleitungsabschnitte von Systemen zur Not- und Nachkühlung (Systeme TF und VF) des Reaktors und der Kondensationskammer. Die Redundanzen VF 2/3 kühlen bei Anforderung die Stränge 2 und 3 des Nachkühlsystems TH über das System VK zurück. TF 22 wird bei Anforderung zur RDB- Bespeisung oder Kondensationskammer-Kühlung eingesetzt. In den Rohrleitungen befindet sich ruhendes Wasser. Erreicht die Temperatur an der Rohrleitungswand 100 °C, so können Dampfblasen und bei Anforderung Kondensationsschläge mit Versagen dieser Teilsysteme die Folge sein.

Genauere Untersuchungen hierzu liegen nicht vor und konnten im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens auch nicht durchgeführt werden (u. a. Ermittlung des Temperaturgradienten und des Verzögerungseffektes aufgrund der Rohrleitungsisolierung). Die Rohrleitungen wurden bei der Entwicklung des Simulationsbeispiels nicht berücksichtigt. Deutlich früher werden die im Brandraum an verschiedenen Stellen vorhandenen Kabel versagen, die als Targets im Simulationsbeispiel modelliert wurden.

Die Rohrleitungsdurchführungen bleiben bei den zu erwartenden Belastungen durch Hitze und Dehnungskräften (thermische Ausdehnung der Rohrleitungen) dicht. Rohrabschottungen besitzen Kompensatoren zur Aufnahme von Axial- und Radialbewegungen.

Der gewählte Brandraum umfasst somit eine ganze Reihe von Parametern, deren Berücksichtigung eine typische Aufgabe bei der Untersuchung dynamisch ablaufender Brandereignisse ist und für deren Modellierung und Untersuchung sich das Analysewerkzeug MCDET in besonderer Weise eignet.

Da die Kombination von CFD-Brandsimulation mit probabilistischen Methoden grundsätzlich sehr große Rechenleistungen erfordert, spielte es für das Referenzszenario auch eine Rolle, durch relativ gut handhabbare Brandsimulationen erfasst werden zu können. Der gewählte Referenzraum ist deshalb relativ klein, so dass das zu diskretisierende Volumen klein bleibt. Das gewählte Brandszenario eines Ölbrands ist relativ dynamisch im Vergleich z. B. zu einem Kabelbrandszenario, so dass relativ kurze Simulationszeiten bis zum Erreichen von Endzuständen möglich sind. Es hat sich inner-

halb dieses Vorhabens gezeigt, dass mit der vorhandenen Rechnerleistung die Simulationsaufgabe gut zu bewältigen ist, so dass die Methoden künftig auch für komplexere Brandsimulationen eingesetzt werden können.

3.1.2 Modellierung des Brandszenarios in FDS

Die Simulation des Brandszenarios erfolgte mit dem Programm Fire Dynamics Simulator (FDS), Version 6.0.1. Für die Diskretisierung im Berechnungsgitter ('Domain') wurde ein Knotenabstand von 0,2 m verwendet. Die Grenzen des Berechnungsgitters waren der Boden, die Decke und die Umfassungswand ohne Türöffnung des Ölversorgungsraums. An den drei Positionen der Türen wurde das Berechnungsgitter mit drei bis fünf Knoten Überstand im Türbereich diskretisiert, um ein freies Abströmen der an den Türen angenommenen Leckströme bzw. den Massenstrom bei geöffneter Tür darstellen zu können.

Eine Bildschirmkopie einer Brandsimulation mit FDS zeigt Abb. 3.2. Das Feuer ist auf der oberen Ebene dargestellt. Die Treppe ist in ihren Umrissen links erkennbar. Das Zuluftkanalystem (violett) mit den beiden Einlässen (rot) sowie das Abluftkanalystem (gelb) mit den beiden Auslässen (rot, mit Wärmesensoren) ist ebenfalls erkennbar. In Bereich der Treppe in Grün sind die Messpunkte dargestellt, an denen die aus der Rußkonzentration resultierende optische Dichte abgegriffen wird. Unter der Decke und unter der Zwischenebene sind je vier Rauchmelder angeordnet.

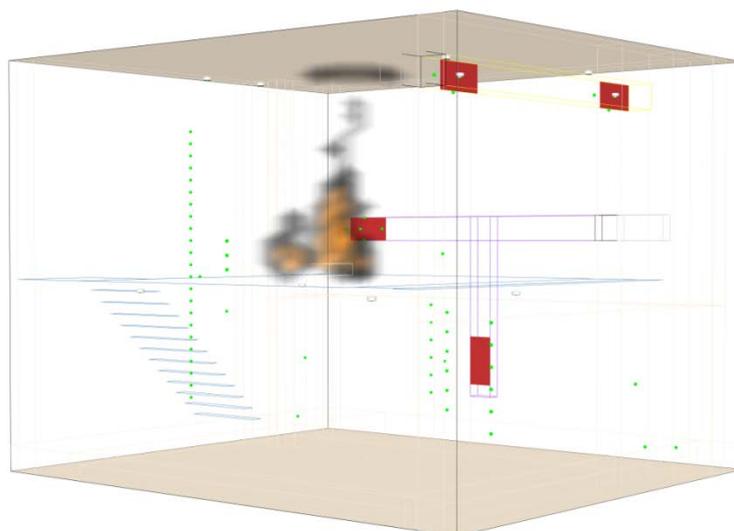


Abb. 3.2 Bildschirmkopie der Brandsimulation mit FDS mit Verdeutlichung des Feuers

Die Leckagen der Türen werden durch je eine Zelle im Bereich der Türschwellen für die Tür zum Montageflur und die Tür zum Raum der Kernsprühpumpe dargestellt. Hierdurch wird ermöglicht, dass Brandrauch hindurchtreten und von außen sichtbar werden kann. Das Begehen und mögliche Offenstehen der Türen wird stochastisch modelliert. Ein brandbedingtes Versagen der Türen ist praktisch auszuschließen. Zur Quantifizierung wird jeweils die optische Dichte D_L abgegriffen. Die optische Dichte korreliert mit der lokalen Rußmassenkonzentration in der Gaszelle entsprechend /HOS 14/.

$$D_L = K_m * c_{\text{ruß}} / \ln(10) \quad (3.1)$$

Für den massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m wird programmintern der Wert von $8700 \text{ m}^2/\text{kg}$ verwendet.

Das Verbrennungsmodell von FDS wurde in den Standardeinstellungen mit einer kritischen Flammentemperatur von 1327 °C belassen. Unterhalb dieser Temperatur wird in Abhängigkeit der lokalen Sauerstoffkonzentration in einer Zelle die Verbrennung von Pyrolysegassen nach dem Mischungsprozess nicht mehr simuliert. Dieses Abbruchkriterium für die Verbrennung wird mit zunehmenden Pyrolyseraten in der Simulation wirksam, so dass die Pyrolysegasse dann vom Freisetzungsort (Ölvorwärmer) zu den Luftöffnungen und Türen gelangen und dort eine Verbrennung stattfindet. Zu diesen Zeitpunkten in den Simulationen sind die Simulationsergebnisse von FDS nur noch bedingt validiert. Allerdings findet die Wärmefreisetzung dann nicht mehr in der Nähe der Targets statt, so dass eine Schädigung zu diesen Zeitpunkten auch nicht mehr erwartet werden kann.

3.2 Aleatorische und epistemische Unsicherheiten bzgl. des Modells zur Branddynamik

In diesem Abschnitt werden sowohl die aleatorischen als auch die epistemischen Unsicherheiten beschrieben, die in der MCDET-Analyse zur Brandentwicklung berücksichtigt werden. Die aleatorischen (stochastischen) Unsicherheiten beziehen sich im Wesentlichen auf die Zeitverteilungen, die aus dem Brandbekämpfungsmodell über das Crew-Modul ermittelt wurden, sowie auf das Versagen von Einrichtungen des anlagentechnischen Brandschutzes. Das Versagen solcher Einrichtungen bezieht sich auf das fehlerhafte Offenbleiben der Brandschutzklappe, wenn die Schmelzlottemperatur überschritten wird, und das fehlerhafte Offenbleiben der Brandraumtür in den Flurbereich,

wenn diese Tür geöffnet wird. Die in der Analyse berücksichtigten aleatorischen Unsicherheiten sind in Tab. 3.1 aufgeführt und werden im Abschnitt 4.1 im Zusammenhang der Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Brandbekämpfungs- und Brandentwicklungsmodell näher erläutert:

Tab. 3.1 Aleatorische Unsicherheiten, die im Modell zur Branddynamik berücksichtigt werden

Aleatorischer Parameter	Verteilung	Verteilungsparameter
Zeit, wann BL den Brandraum erreicht [s] → $f(t_{BLerrRm})$ siehe Abschnitt 4.1	Histogramm	U(130,245) , $p = 0,2$ U(245,350) , $p = 0,55$ U(350,480) , $p = 0,14$ U(480,600) , $p = 0,11$
Zeit, wann die LG den Brandraum erreicht [s] → $f(t_{LGerrRm})$ siehe Abschnitt 4.1	Histogramm	U(600,850) , $p = 0,82$ U(850,950) , $p = 0,17$ U(950,1400) , $p = 0,01$
Zeit vom Eintreffen des BL am Brandraum bis zum Öffnen der Tür [s]	uniform	Min = 2 Max = 6 Referenz: 4
Zeit [s] vom Eintreffen des BL am Brandraum bis zur Aktivierung der FLA unter der Bedingung, dass Rauch unter der Tür sichtbar ist. → $f(t_{BLerrRm-FLA,2})$ siehe Abschnitt 4.1	uniform	Min = 81 Max = 127 Referenz: 104
Zeit [s] vom Eintreffen des BL am Brandraum bis zur Aktivierung der FLA unter der Bedingung, dass kein Rauch unter der Tür sichtbar ist. → $f(t_{BLerrRm-FLA,1})$ siehe Abschnitt 4.1	uniform	Min = 100 Max = 150 Referenz: 125
Zeit [s] vom Eintreffen des BL am Brandraum bis zur Betätigung des HFL unter der Bedingung, dass BL den Raum betreten kann. → $f(t_{BLerrRm-HFL})$ siehe Abschnitt 4.1	uniform	Min = 40 Max = 64 Referenz: 52
Wahrscheinlichkeit, dass BL Löschung nicht innerhalb 1800 beginnen kann	Bernoulli	6.0 E-03
Zeit [s] vom Eintreffen der LG am Brandraum bis zum Löschbeginn mit ihrer Ausrüstung unter der Bedingung, dass Rauch unter der Tür sichtbar ist und die LG vor 1800 s die Löschung beginnt. → $f(t_{LGerrRm-LöAusr,1})$ siehe Abschnitt 4.1	Histogramm	U(100,155), $p = 0,99$ U(785,1050), $p = 0,006$ U(1050,1320), $p = 0,004$
Zeit [s] vom Eintreffen der LG am Brandraum bis zum Löschbeginn mit ihrer Ausrüstung unter der Bedingung, dass kein Rauch unter der Tür sichtbar ist und die LG vor 1800 s die Löschung beginnt. → $f(t_{LGerrRm-LöAusr,2})$ siehe Abschnitt 4.1	Histogramm	U(60,160), $p = 0,99$ U(740,050), $p = 0,005$ U(1050,1350), $p = 0,005$

Aleatorischer Parameter	Verteilung	Verteilungsparameter
Zeit [s] vom Eintreffen der LG am Brandraum bis zur durch Aktivierung der FLA unter der Bedingung, dass LG vor BL am Brandraum eintrifft und Rauch unter der Tür sichtbar ist. → $f(t_{LGerrm-FLA})$ siehe Abschnitt 4.1	uniform	Min = 80 Max = 125 Referenz: 104
Wahrscheinlichkeit, dass LG die Löschung nicht innerhalb 1800 s beginnen kann unter der Bedingung, dass die Brandbekämpfung durch den BL nicht erfolgreich ist.	Bernoulli	9,95 E-04
Wahrscheinlichkeit, dass RG während seiner Schicht innerhalb 1800 s den Brandraum erreicht.	Bernoulli	0,0625
Zeit [s], wann RG zufällig am Brandraum ankommt unter der Bedingung, dass er innerhalb einer halben Stunde den Brandraum erreicht.	uniform	Min = 10 Max = 1800 Referenz: 905
Zeit [s] vom Eintreffen des RG am Brandraum bis zur Aktivierung der FLA unter der Bedingung, dass Rauch unter der Tür sichtbar ist. → $f(t_{RGerrRm-FLA,2})$ siehe Abschnitt 4.1	uniform	Min = 113 Max = 163 Referenz: 104
Zeit [s] vom Eintreffen des RG am Brandraum bis zur Aktivierung der FLA unter der Bedingung, dass kein Rauch unter der Tür sichtbar ist. → $f(t_{RGerrRm-FLA,1})$ siehe Abschnitt 4.1	uniform	Min = 135 Max = 195 Referenz: 165
Zeit [s] vom Eintreffen des RG am Brandraum bis zur Betätigung des HFL unter der Bedingung, dass RG den Raum betreten kann. → $f(t_{RGerrRm-HFL})$ siehe Abschnitt 4.1	uniform	Min = 40 Max = 64 Referenz: 52
Zeit [s] vom Eintreffen des RG am Brandraum bis zum Löschbeginn der LG unter der Bedingung, dass LG vor 1800 s am Brandraum eintrifft. $f(t_{RGerrRm-LöAusr,2})$ siehe Abschnitt 4.1	Histogramm	U(710, 1040) , p = 0,98 U(1040, 1240) , p = 0,015 U(1240, 1700) , p = 0,005
Verfügbarkeit der Brandmeldeanlage Verfügbar nicht verfügbar	Bernoulli	0,995 0,005
Wahrscheinlichkeit, dass Brandschutzklappe fehlerhaft nicht schließt	Bernoulli	0,01
Wahrscheinlichkeit, dass Tür des Brandraums fehlerhaft nicht schließt	Bernoulli	0,001

Die epistemischen Unsicherheiten beziehen sich auf die Modellparameter des FDS-Codes und auf die Zuverlässigkeitskenngrößen aktiver Brandschutzeinrichtungen, d. h. Brandschutzklappe und Brandraumtür. Die spezifizierten Unsicherheiten sind in Tab. 3.2 aufgeführt.

Tab. 3.2 Epistemische Unsicherheiten bzgl. des Modells zur Branddynamik

Epistemischer Parameter	Verteilung	Verteilungsparameter
Wert der Optischen Dichte, ab dem Rauchaustritt unter der Brandraumtür sichtbar ist [1/m]	uniform	Min = 0,2 Max = 0,4 Referenz: 0,3
Response Time Index (RTI) der Aktivierungstemperatur für die Brandschutzklappe [$\sqrt{m \cdot s}$]	uniform	Min = 50 Max = 200 Referenz: 125
Wert der Optischen Dichte, ab dem der Brandraum nicht mehr betreten werden kann [1/m]	uniform	Min = 0,3 Max = 0,5 Referenz: 0,4
Anteil des Brennstoffs (Öl) , der in Rauch umgewandelt wird (Soot_Oil)	uniform	Min = 0,095 Max = 0,099 Referenz: 0,097
Zeit, wann maximale Wärmefreisetzungsrate erreicht ist [s]	uniform	Min = 250 Max = 700 Referenz: 425
Wärmeleitfähigkeit des Kabels [W/m*K]	uniform	Min = 0,15 Max = 0,4 Referenz: 0,275
Spezifische Wärme des Kabels [kJ/kg*K]	uniform	Min = 0,95 Max = 1,5 Referenz: 1,225
Dicke der Kabelisolation [m]	uniform	Min = 0,0012 Max = 0,002 Referenz: 0,0016
Dichte des Kabels [kg/m ³]	uniform	Min = 833 Max = 1430 Referenz: 1131
Spezifische Wärme für Beton [kJ/kg*K]	uniform	Min = 0,5 Max = 0,8 Referenz: 0,65
Wärmeleitfähigkeit für Beton [W/m*K]	uniform	Min = 1,4 Max = 2,1 Referenz: 1,75
Wanddicke [m]	uniform	Min = 0,32 Max = 0,42 Referenz: 0,37
Wahrscheinlichkeit, dass Tür des Brandraums fälschlicherweise nicht schließt	Beta	$\alpha = 1,5$ $\beta = 298,5$ Referenz: 0,005

Epistemischer Parameter	Verteilung	Verteilungsparameter
Wahrscheinlichkeit, dass Brandschutzklappe fälschlicherweise nicht schließt	Beta	$\alpha = 1,5$ $\beta = 148,5$ Referenz: 0,01
Temperatur der Innenwand der Kabelummantelung, bei der das Kabel versagt [°C]	uniform	Min = 145 Max = 195 Referenz: 170
Zeitdauer wie lange die Innenwand der Kabelummantelung kritischen Temperaturbereichen ausgesetzt sein darf, bis das Kabel versagt [s]		
≥ 145 °C	uniform	Min = 360 Max = 480 Referenz: 420
≥ 150 °C	uniform	Min = 240 Max = 360 Referenz: 300
≥ 160 °C	uniform	Min = 180 Max = 250 Referenz: 215
≥ 170 °C	uniform	Min = 120 Max = 200 Referenz: 160
≥ 180 °C	uniform	Min = 40 Max = 120 Referenz: 80

4 MCDET/FDS-Analyse

Eine Besonderheit der vorliegenden Brandanalyse ist, dass sie als integrale deterministisch-probabilistische Sicherheitsanalyse (IDPSA) durchgeführt wurde und dass die Wechselwirkungen der Branddynamik mit den durch menschliche Handlungen durchgeführten Brandbekämpfungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Die menschlichen Handlungsabläufe zur Brandbekämpfung (siehe Abschnitt 2.3) wurden dabei durch das Crew-Modul als eigenständiger dynamischer Prozess simuliert und analysiert. Die Implementierung der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Handlungsabläufe und Basishandlungen in das Crew-Modul erfolgte unter Verwendung über die in /KLO 14/ beschriebene Benutzeroberfläche, die zur Erstellung der Eingabedatensätze für das Crew-Modul entwickelt wurde.

In Abschnitt 4.1 wird beschrieben, in welcher Weise die Wechselwirkungen zwischen Brandentwicklung und Brandbekämpfung in der Analyse berücksichtigt wurden. In Abschnitt 4.2 wird kurz das Ablaufschema skizziert, wie ein dynamischer Ereignisbaum automatisch generiert wird.

4.1 Methodik zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Brandbekämpfung und Brandentwicklung

Die Wechselwirkungen zwischen dem Prozess der Brandbekämpfung und dem Prozess der Brandentwicklung können prinzipiell integral in einer Simulation berücksichtigt werden. Bei der integralen Berücksichtigung der Wechselwirkungen können sich jedoch insbesondere dann Probleme bzgl. des Rechenaufwands ergeben, wenn bzgl. der Handlungsabläufe sehr viele Pfade generiert werden, die sich aus stochastischen Einflussgrößen und aus unterschiedlichen Bedingungen bzgl. der Brandentwicklung ergeben können.

Die prinzipielle Problematik soll im Folgenden an einem kleinen Ausschnitt des Handlungsablaufs zur Brandbekämpfung, der in Abschnitt 2.3.1 im Detail beschrieben wird, demonstriert werden. Der Ausschnitt des Handlungsablaufs soll sich auf die Situation des Brandläufers (BL) beziehen, der durch den SL über den Brand alarmiert worden ist und sich zum Brandraum begibt, um den Brand zu bekämpfen.

Aufgrund verschiedener aleatorischer Unsicherheiten (siehe Abschnitt 2.2.1) wird eine Vielzahl verschiedener Sequenzen erzeugt, für die sich unterschiedliche Zeitpunkte

ergeben, zu denen der BL den Brandraum erreicht und in Abhängigkeit der vorliegenden Bedingungen Maßnahmen zur Löschung des Brandes ergreift. In Abhängigkeit der Situation kann der Brandläufer den Brand entweder durch die manuelle Aktivierung der Sprühwasseranlage (FLA) oder den Handfeuerlöscher (HFL) bekämpfen. Wenn der BL zu einem bestimmten Zeitpunkt t_{errRaum} am Brandraum ankommt, hängen die weiteren Handlungen des Brandläufers davon ab, ob Rauch aus dem Brandraum in den Flurbereich austritt und sichtbar ist oder nicht. Wenn Rauch unter der Brandraumtüre austritt, wird der BL zur Brandbekämpfung versuchen, die FLA manuell zu aktivieren. Auch wenn man sich allein nur auf diese Situation beschränkt, ergibt sich durch die zeitlichen Variationen der auszuführenden Handlungen eine Vielzahl unterschiedlicher Sequenzen, bei denen der Zeitpunkt der manuellen Aktivierung der FLA variiert.

Wenn aufgrund stochastischer Unsicherheiten bzgl. der Handlungszeiten unterschiedliche Zeitpunkte t_1, \dots, t_n vorliegen, zu denen die manuelle Aktivierung der FLA erfolgt, dann muss zu jedem dieser n Zeitpunkte t_1, \dots, t_n ein Restart-Punkt bzgl. des verwendeten Rechencodes FDS erzeugt werden, auf den jeweils mit der modifizierten Eingabedatei des Rechenprogramms aufgesetzt werden muss, um die Löschung mittels des manuell aktivierten Sprühwasserlöschsystems zu simulieren.

Die analoge Situation ergibt sich für die variierenden Zeitpunkte, wann der BL mit dem Handfeuerlöscher oder die Löschgruppe (LG) mit ihrer Löschausrüstung den Brand bekämpft oder der BL bzw. die LG die Tür des Brandraums öffnet, um den Brand im Raum zu lokalisieren und zu bekämpfen. Für alle Aktionen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt werden und einen Einfluss auf die weitere Brandentwicklung haben, wird durch die MCDET-Analyse ein eigener Ablauf simuliert, der zum jeweiligen Zeitpunkt aufsetzt, an dem die betreffende Aktion durchgeführt wird.

Bei einer integralen Simulation, muss parallel zu den verschiedenen Sequenzen der Handlungsabläufe jeweils der Rechencode zur Brandentwicklung ablaufen. Der dazu notwendige Rechenaufwand ist in vielen Anwendungen nicht praktikabel, wenn die menschlichen Handlungsabläufe zu einer Vielzahl unterschiedlicher Sequenzen führt, was in der Regel der Fall ist. Um die Vielzahl der damit verbundenen Rechnungen mit dem FDS-Code zu vermeiden, wurde zur Lösung im Rahmen der durchgeführten probabilistische Dynamikanalyse eine mögliche Vorgehensweise angewendet, mit der der notwendige Rechenaufwand in Grenzen gehalten wird und die Wechselwirkungen zwischen den menschlichen Handlungsabläufen der Brandbekämpfung und des Prozesses der Brandentwicklung dennoch berücksichtigt werden können.

Die Flexibilität des Crew-Moduls – als Bestandteil von MCDET – erlaubt sowohl eine integrale Simulation von menschlichen Handlungen und Prozessdynamik, als auch eine Simulation der Handlungsabläufe abgekoppelt von der Berechnung des physikalischen Prozesses. Durch die Möglichkeit, den menschlichen Handlungsablauf auch abgekoppelt von einem deterministischen Rechencode zu simulieren, benötigt die Simulation der Handlungsabläufe sehr wenig Rechenzeit. Durch diese Eigenschaften des Crew-Moduls wird zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Brandbekämpfung und dem Prozess der Brandentwicklung folgendes praktikable Konzept vorgeschlagen und angewendet:

In dem modellierten Handlungsablauf (siehe Abschnitt 2.3) werden diejenigen Situationen spezifiziert, in denen für den weiteren Handlungsablauf Informationen aus dem physikalischen Prozess benötigt werden oder Handlungen durchgeführt werden, die den physikalischen Prozess beeinflussen. Dies liegt beispielsweise in folgenden Situationen vor:

- Sofern der BL bzw. die LG den Brandraum erreicht, wird anhand der Information aus der Brandentwicklung bestimmt, ob Rauch unter der Tür in den Flurbereich austritt und sichtbar ist oder nicht. Davon hängt ab, ob der BL die Tür des Brandraums geschlossen lässt und die Löschung durch die Aktivierung der FLA beginnt oder die Tür des Brandraums öffnet, um die Situation im Raum einzuschätzen.
- Wenn kein Rauch unter der Brandraumtür in den Flurbereich austritt, öffnet der BL diese Tür und schätzt die Rauchentwicklung im Raum ab. Von der Rauchentwicklung im Raum hängt ab, ob der BL den Raum betreten und ggf. den Brand mit dem HFL bekämpfen kann, oder ob er den Raum nicht betreten kann, worauf der BL versucht, die FLA manuell zu auszulösen.

Zu jeder der spezifizierten Situationen (z. B. Rauch unter der Tür zum Brandraum sichtbar bzw. nicht sichtbar oder Rauchentwicklung im Brandraum lässt ein Betreten des Raumes zu bzw. nicht zu) werden durch Pre-Processing Analysen mit dem Crew-Modul die in der weiteren Analyse benötigten Zeitverteilungen unter den jeweiligen Bedingungen berechnet, die Einfluss auf die Verteilung der Zeiten verschiedener relevanter Aktionen haben können. Beispielsweise ist die Zeitverteilung, wann der BL versucht, die FLA manuell zu aktivieren, abhängig davon, ob Rauch unter der Brandraumtür austritt oder nicht, wann der BL am Brandraum ankommt oder wie die Rauchentwicklung ist, die im Brandraum vorherrscht, wenn der BL den Raum betritt, um die Situation im Brandraum einzuschätzen.

Voraussetzung zu den Pre-Processing-Analysen ist, dass im Vorfeld die potentiell relevanten Prozessbedingungen, die Einfluss auf den weiteren Handlungsablauf und somit auf die zu ermittelnden Zeitverteilungen bzgl. des Handlungsablaufs haben, spezifiziert werden müssen. Es hat sich bei der Modellierung der Brandbekämpfungsmaßnahmen gezeigt, dass sich die potentiell relevanten Prozessbedingungen bei der Erstellung und Implementierung der Handlungslisten im Crew-Modul aus dem Kontext des modellierten Handlungsablaufs ergeben und die Festlegung der relevanten Prozessbedingungen somit relativ leicht durchzuführen ist.

Mit dem Crew-Modul ist es schließlich möglich, Handlungsabläufe unter der Bedingung verschiedener Situationen, die sich durch die Branddynamik ergeben, im Rahmen von Pre-Processing-Analysen zu simulieren und die entsprechenden bedingten Zeitverteilungen zu ermitteln, die dann als aleatorische Größen in die MCDET-Analyse der Branddynamik eingebunden werden.

Im Folgenden wird aufgeführt, welche Zeitverteilungen und unter welchen Bedingungen die Verteilungen durch Pre-Processing Analysen mit dem Crew-Modul ermittelt wurden. Die jeweiligen Verteilungen sind in Tab. 3.1 angegeben (siehe Abschnitt 3.2).

- Zeitverteilung $f(t_{BLerrRm})$, wann der BL den Brandraum erreicht,
- Verteilung $f(t_{LGerrRm})$ des Zeitpunktes, wann die Mannschaft der LG den Brandraum erreicht,
- Zeitverteilung $f(t_{TrAuf})$ wann die Tür des Brandraums durch den BL geöffnet wird. Die Verteilung ergibt sich durch die Summe der ausgespielten Zufallszeiten, wann der BL den Brandraum erreicht und der zufälligen Zeitdauer, bis er die Tür des Brandraums öffnet. Die Verteilung wird unter der Bedingung ermittelt, wenn der BL den Brandraum erreicht und kein Rauch unter der Tür sichtbar ist.
- Verteilung $f(t_{BL-FLA})$ der Zeit, wann der BL beginnt den Brand durch die Aktivierung der FLA zu löschen. Da es zwei verschiedene Situationen gibt, bei der der BL die Löschung über die Aktivierung der LA durchführt, wurden zwei Zeitverteilungen unter den jeweiligen Bedingungen ermittelt, die in Tab. 4.1 beschrieben sind. Die Zeitverteilungen ergeben sich durch die Summe der ausgespielten Zufallszeiten, wann der BL den Brandraum erreicht und der zufälligen Zeitdauer, die er unter den verschiedenen Bedingungen benötigt, die FLA manuell zu aktivieren.

Tab. 4.1 Zeitverteilungen, wann BL versucht, die FLA manuell auszulösen, unter unterschiedlichen Bedingungen bzgl. der Brandentwicklung

Zeitverteilung	Bedingung
$f(t_{BL-FLA,1})$	kein Rauch unter der Tür sichtbar. BL öffnet die Tür und schätzt die Situation der Rauchentwicklung im Raum ein. Die Rauchentwicklung im Raum ist so groß, dass der BL den Raum nicht betreten kann. Erst danach begibt sich der BL zur Ventilstation, um die FLA manuell zu aktivieren.
$f(t_{BL-FLA,2})$	Rauch unter der Tür sichtbar. BL geht sofort zur Ventilstation, um die FLA manuell zu aktivieren.

- Verteilung $f(t_{BL-HFL})$ der Zeit, wann der BL beginnt, die Brandbekämpfung mittels Handfeuerlöcher (HFL) durchzuführen. Die Zeitverteilung t_{LG-HFL} wird unter der Bedingung ermittelt, dass kein Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar ist und die Rauchentwicklung im Brandraum noch nicht so weit fortgeschritten ist, dass der BL sich in den Raum begeben kann.
- Zeitverteilung $f(t_{LG-LöAusr})$, wann die LG beginnt den Brand unter Verwendung ihrer Löschausrüstung bzw. durch Aktivierung der FLA zu bekämpfen. Diese Zeitverteilung wird unter verschiedenen Bedingungen ermittelt, die in der nachfolgenden Tab. 4.2 beschrieben sind.

Tab. 4.2 Zeitverteilungen wann LG versucht, den Brand mit ihrer Löschausrüstung zu löschen, unter unterschiedlichen Bedingungen der Brandentwicklung

Zeitverteilung	Bedingung
$f(t_{LG-LöAusr,1})$	BL trifft vor der LG am Brandraum ein und Rauch ist unter der Tür sichtbar und die FLA kann vom BL nicht manuell aktiviert werden
$f(t_{LG-LöAusr,2})$	BL trifft vor der LG am Brandraum ein und kein Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar und BL kann den Brandraum wegen zu großer Rauchentwicklung nicht betreten und die FLA kann vom BL nicht manuell ausgelöst werden
$f(t_{LG-FLA})$	LG trifft vor dem BL am Brandraum ein und Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar

- Verteilung $f(t_{RG-FLA})$ der Zeit, wann der RG die FLA aktiviert. Die Zeitverteilung wurde unter den beiden Bedingungen berechnet, die in Tab. 4.3 beschrieben sind:

Tab. 4.3 Zeitverteilungen, wann RG versucht, die FLA manuell auszulösen, unter unterschiedlichen Bedingungen der Brandentwicklung und unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage nicht auslegungsgemäß funktioniert

Zeitverteilung	Bedingung
$f(t_{RG-FLA,1})$	Brandmeldeanlage funktioniert nicht auslegungsgemäß, der RG kommt zu einer zufälligen Zeit am Brandraum an. und Rauch ist unter der Tür des Brandraums sichtbar
$f(t_{RG-FLA,2})$	Brandmeldeanlage funktioniert nicht auslegungsgemäß, der RG kommt zu einer zufälligen Zeit am Brandraum an, kein Rauch ist unter der Tür sichtbar, und die Rauchentwicklung im Raum ist so groß ist, dass der RG den Raum nicht betreten kann.

- Verteilung $f(t_{LG-AL3})$ der Zeit, wann die LG beginnt, den Brand mit ihrer Löschausrüstung zu bekämpfen, wenn die Brandmeldeanlage defekt ist. Die Zeitverteilung wurde unter den in Tab. 4.4 beschrieben zwei Bedingungen berechnet:

Tab. 4.4 Zeitverteilungen wann LG versucht, den Brand mit ihrer Löschausrüstung zu löschen, unter unterschiedlichen Bedingungen der Brandentwicklung und unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage nicht auslegungsgemäß funktioniert

Zeitverteilung	Bedingung
$f(t_{LG-AL3,1})$	Brandmeldeanlage funktioniert nicht auslegungsgemäß, der RG kommt zu einer zufälligen Zeit am Brandraum an, Rauch ist unter der Tür des Brandraums sichtbar, RG alarmiert den SL, kann aber die FLA nicht manuell auslösen
$f(t_{LG-AL3,2})$	Brandmeldeanlage funktioniert nicht auslegungsgemäß, der RG kommt zu einer zufälligen Zeit am Brandraum an, kein Rauch ist unter der Tür sichtbar, die Rauchentwicklung im Raum ist so groß ist, dass der RG den Raum nicht betreten kann, RG alarmiert den SL kann aber die FLA nicht manuell auslösen

Die durch das Pre-Processing ermittelten Zeitverteilungen werden im Probabilistik-Modul von MCDET als aleatorische Größen spezifiziert. Die Zufallswerte aus den jeweiligen Verteilungen werden genau dann in die Brandsimulation eingebunden, wenn die zu den Verteilungen gehörigen Bedingungen während der Brandsimulation erfüllt sind. Die Zufallswerte werden aus den jeweiligen, in Tab. 3.1 spezifizierten Verteilungen ausgespielt (siehe Abschnitt 3.2).

Mit diesem Konzept des Pre-Processing der Handlungsabläufe ist es möglich, die Wechselwirkungen des Handlungsablaufs mit der Brandentwicklung berücksichtigen zu können. Näher veranschaulicht wird dies im folgenden Abschnitt 4.2.

4.2 Ablaufschema zur Erzeugung eines Dynamischen Ereignisbaumes (DET- Dynamic Event Tree)

Die im Abschnitt 4.1 bestimmten bedingten Zeitverteilungen werden als aleatorische Größen in die Simulation der Brandentwicklung eingebunden. Durch die aus den bedingten Verteilungen ausgespielten Zufallswerte sind diejenigen Zeitpunkte festgelegt,

- wann die bei der Brandbekämpfung beteiligten Personen Handlungen ausführen, die einen Effekt auf die weitere Brandentwicklung haben (z. B. Öffnen der Tür zum Brandraum, Beginn der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr mit der Löschausrüstung) oder
- wann Informationen aus dem Prozess benötigt werden, durch die der weitere Handlungsablauf bestimmt wird (z. B. kein Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar wenn der BL den Brandraum erreicht, aber die Rauchentwicklung im Raum so groß ist, dass der BL den Raum nicht betreten kann).

Die Informationen aus der Brandsimulation werden benötigt, um zu bestimmen, ob zum gegebenen Zeitpunkt Prozessbedingungen erfüllt sind, die zur Aktivierung der jeweils zugehörigen bedingten Zeitverteilung führen, die über das Pre-Processing mit dem Crew-Modul bestimmt wurden. Aus den aktivierten Zeitverteilungen werden Zufallswerte gezogen, die angeben, wann die jeweiligen beteiligten Personen bestimmte Handlungen ausführen.

Der Zeitpunkt, wann die Prozessbedingungen abgefragt werden, ist abhängig von den Unsicherheiten, die sich durch den Handlungsablauf ergeben. Die Verteilungen der Zeitpunkte, wann bestimmte Handlungen durchgeführt werden und die Einfluss auf den Prozess der Brandentwicklung haben, sind wiederum abhängig von den Bedingungen, die sich durch den Prozess der Brandentwicklung ergeben. Die Wechselwirkung kann anhand folgender einfacher Situation skizziert werden, in der der BL zu unterschiedlichen zufälligen Zeitpunkten den Brandraum erreicht und in Abhängigkeit der Rauchentwicklung die Zeitverteilung bestimmt wird, aus der eine Zufallszeit ausgespielt wird, wann der BL die FLA manuell aktiviert:

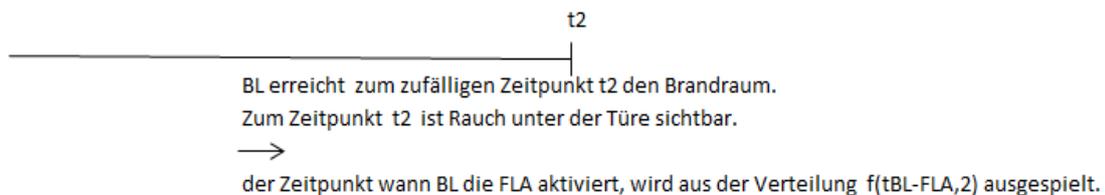
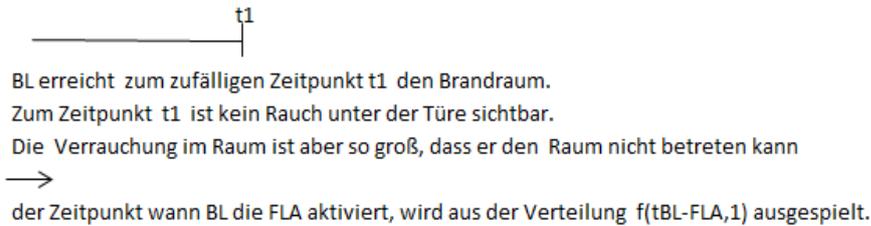


Abb. 4.1 Skizze zur Berücksichtigung der Wechselwirkung von Prozesszuständen und aleatorischen Unsicherheiten

Wie diese Wechselwirkungen in der MCDET-Analyse berücksichtigt werden, soll im Folgenden anhand des Ablaufs zur Erzeugung eines dynamischen Ereignisbaumes beispielhaft beschrieben werden:

Im Vorfeld der MCDET-Analyse wurden die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Zeitverteilungen, die sich aus dem Handlungsablauf unter verschiedenen Prozessbedingungen ergeben, durch Pre-Processing Analysen mit dem Crew-Modul ermittelt.

- Die Erzeugung eines dynamischen Ereignisbaumes (DET) beginnt damit, dass aus den Verteilungen $f(t_{BLerrRm})$ und $f(t_{LGerrRm})$ jeweils eine Zufallszeit $t_{BLerrRm}$ und $t_{LGerrRm}$ ausgespielt wird. Damit ist zugleich festgelegt, ob der BL oder die LG zuerst am Brandraum eintrifft. Des Weiteren werden die diskreten aleatorischen Unsicherheiten bzgl. der vorgenannten Brandschutzeinrichtungen (z. B. Tür des Brandraums schließt nicht bzw. bleibt fehlerhaft offen, wenn das Personal den Brandraum betritt, oder die Brandschutzklappe schließt nicht bzw. bleibt fehlerhaft offen, wenn die entsprechende Temperatur am Schmelzlot erreicht ist) bestimmt, die zu den Verzweigungen des dynamischen Ereignisbaums führen. Die aleatorischen Unsicherheiten, die im Rahmen der Brandsimulationen berücksichtigt werden, sind in Abschnitt 0 beschrieben.
- Der FDS-Code wird so eingerichtet, dass zu beiden Zeitpunkten, wann der BL bzw. die LG am Brandraum eintrifft, ein Restart-Punkt erzeugt wird. D. h., wenn bei einer

Simulation einer Sequenz des DET die die Zeitpunkte $t_{BLerrRm}$ bzw. $t_{LGerrRm}$ erreicht werden, wird durch das MCDET-Steuerungsprogramm ('Scheduler') die Berechnung der Brandentwicklung durch den FDS-Code unterbrochen. Die jeweiligen Prozessgrößen, die zu diesem Zeitpunkt vorliegen und durch die der Prozesszustand bzw. die vorliegenden Prozessbedingungen festgelegt sind, werden aus den Ausgabe-Files von FDS gelesen. Die zu den Zeiten $t_{BLerrRm}$ bzw. $t_{LGerrRm}$ vorliegenden Prozessbedingungen, können bzgl. einiger Sequenzen des DET gleich sein, können sich aber auch bzgl. einiger Sequenzen unterscheiden. Wenn z. B. der Zeitpunkt, wann die Temperatur am Schmelzlot für dessen Schmelzen erreicht ist und die Brandschutzklappe (BSK) schließen muss, vor dem Zeitpunkt $t_{BLerrRm}$ liegt, dann können sich zum Zeitpunkt $t_{BLerrRm}$ unterschiedliche Bedingungen in der Rauchentwicklung in Abhängigkeit davon ergeben, ob die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt oder fehlerhaft geöffnet bleibt.

- Wenn zu den entsprechenden Zeitpunkten die vorherrschenden Bedingungen der Brandentwicklung bestimmt wurden, werden Zufallswerte aus denjenigen Verteilungen ausgespielt, die zu den vorliegenden Bedingungen gehören und die im Rahmen des Pre-Processing mit dem Crew-Modul ermittelt wurden. Wenn beispielsweise der BL den Brandraum erreicht und die Situation vorliegt, dass Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar ist, so wird eine Zufallszeit $t_{BL-FLA,2}$ aus der Verteilung $f(t_{BL-FLA,2})$ ausgespielt, die angibt wann der BL versucht, die FLA manuell zu aktivieren. FDS muss deshalb so eingerichtet werden, dass zu dem Zeitpunkt $t_{BL-FLA,2}$ ein Restart-Punkt gesetzt wird. Wenn die Simulation der Branddynamik diesen Zeitpunkt erreicht, wird die Simulation durch das Steuerungsprogramm unterbrochen. Das Steuerungsprogramm erkennt, dass der BL zu diesem Zeitpunkt versucht, die FLA manuell auszulösen. Eine aleatorische Größe bzgl. der FLA besteht darin, dass sich die FLA durch das Öffnen des Ventils manuell auslösen lässt oder nicht. An dieser Stelle erfolgt eine Verzweigung mit der Alternative 1, dass sich die FLA durch den BL manuell auslösen lässt, und der Alternative 2, dass sich die FLA durch den BL nicht manuell auslösen lässt. Die Sequenzen zu den beiden Alternativen werden sukzessive berechnet.
 - Alternative 1:

Da sich die FLA durch den BL zum Zeitpunkt $t_{BL-FLA,2}$ manuell aktivieren lässt, beginnt zu diesem Zeitpunkt die Bekämpfung des Brandes. Bei der Löschung durch die FLA wurde angenommen, dass der Effekt der Löschung relativ schnell nach ca. 10 s eintritt. D. h., bei der Berechnung der Sequenz überprüft das Steuerungsprogramm ab dem Zeitpunkt $t_{BL-FLA,2} + 10$ s in regelmäßigen

Abständen, ob sich der Löscherfolg bereits eingestellt hat. Für den Erfolg der Löschung wird in der Analyse das Kriterium betrachtet, dass die Löschung des Brandes stattfindet und die Temperatur des Kabels an der Innenwand der Kabelummantelung 120 °C unterschreitet.

– Alternative 2:

In dieser Sequenz kann die FLA durch den BL nicht aktiviert werden. In dieser Situation ist die Bedingung für die Verteilung $f(t_{LG-LöAusr,1})$ gegeben, wenn die LG den Brandraum innerhalb 1300 s erreicht, d. h. $t_{LGerrRm} \leq 1300$ s. Wenn die LG nach 1300 s am Brandraum ankommt, d. h. $t_{LGerrRm} > 1300$ s, ist die Bedingung für die Verteilung $f(t_{LG-LöAusr,2})$ gegeben (vgl. Tab. 4.2 in Abschnitt 4.1). Wenn $t_{LGerrRm} \leq 1300$ s gilt, wird durch den FDS-Code ein Restart-Punkt zum Zeitpunkt $t_{LG-LöAusr,1}$ gesetzt, wobei $t_{LG-LöAusr,1}$ ein ausgespielter Zufallswert der Verteilung $f(t_{LG-LöAusr,1})$ ist. Wenn die Simulation der Sequenz den Zeitpunkt $t_{LG-LöAusr,1}$ erreicht, wird die Simulation unterbrochen und das Steuerungsprogramm stellt die Eingabedatei des FDS-Codes so ein, dass die Löschung durch die LG beginnt. Bzgl. der Löschung mittels der Löschausrüstung der LG wurde in Abhängigkeit von der Rauchentwicklung im Raum eine Zeitverzögerung der Löschung angenommen (siehe Abschnitt 2.2.2). In Abhängigkeit der Rauchentwicklung im Raum wird zur Zeit $t_{LG-LöAusr,1}$ die Verzögerungszeit $t_{deayLLschg}$ addiert. Ab der Zeit $t_{LG-LöAusr,1} + t_{deayLLschg}$ beginnt die effektive Löschung durch die Feuerwehr. Ab diesem Zeitpunkt wird durch das Steuerungsprogramm in regelmäßigen Zeitabständen die Temperatur der Innenwand des Kabelmantels abgefragt, um den Löscherfolg zu ermitteln. Wenn die Temperatur der der Innenwand des Kabelmantels 120 °C unterschreitet, ist das Abbruchkriterium erfüllt und der Rechenlauf der Sequenz wird beendet.

In analoger Weise erfolgt die Berechnung aller Sequenzen, die in einem dynamischen Ereignisbaum erzeugt werden.

Um die Wechselwirkungen zwischen Brandbekämpfung und Brandentwicklung in der Analyse zu berücksichtigen zu können, werden unter Verwendung des Crew-Moduls bedingte Zeitverteilungen in Abhängigkeit von Zuständen der Brandentwicklung ermittelt, die sich auf die Handlungsabläufe der Brandbekämpfung auswirken. Die über das Crew-Modul ermittelten Zeitverteilungen werden als aleatorische Unsicherheiten im Probabilistik-Modul von MCDET spezifiziert und kommen in der MCDET-Brandanalyse

jeweils zur Anwendung, wenn in der Brandsimulation der Zustand der Brandentwicklung zu einem bestimmten Zeitpunkt die betreffende Bedingung erfüllt.

Wenn z. B. der Brandläufer die Tür des Brandraums erreicht, werden unterschiedliche Zeitverteilungen in Abhängigkeit vom Zustand berechnet, ob Rauch unter der Tür sichtbar ist und auf den Flur austritt oder kein Rauchaustritt in den Flurbereich sichtbar ist. Zur Bewertung der Verrauchung wird die Prozessgröße 'Optical Density' (optische Dichte) verwendet, die am unteren Öffnungsspalt der Tür zum Flur gemessen wird. Die Prozessgröße 'Optical Density' liefert ein Maß der Rauchdichte pro Meter an der gemessenen Stelle. Als Kriterium dafür, ob Rauch unter der Tür zum Flur sichtbar ist oder nicht, wurde für die optischen Dichte ein kritischer Wert κ am unteren Öffnungsspalt der Tür des Brandraums angenommen, der aus einer Gleichverteilung zwischen 0,2 und 0,4 ausgespielt wurde. D. h., wenn der BL den Brandraum erreicht hat und die optische Dichte den Wert κ überschreitet, wird von der Situation ausgegangen, dass Rauch unter der Tür zum Flur sichtbar ist. Ist der Wert der optischen Dichte zum entsprechenden Zeitpunkt $\leq \kappa$ so wird angenommen, dass kein Rauchaustritt unter der Tür in den Flurbereich sichtbar ist.

Wenn Rauch unter der Tür sichtbar ist (d. h. optische Dichte $> \kappa$), wird ein Zufallswert aus der entsprechenden Zeitverteilung ausgespielt, die über das Crew-Modul unter der Bedingung ermittelt wurde, dass Rauch unter der Tür sichtbar ist. Der aus der Verteilung ausgespielte Wert gibt z. B. an, wie lange der Brandläufer vom aktuellen Zeitpunkt (Zeitpunkt des Eintreffens an der Brandraumtür) bis zur Aktivierung der Feuerlöschanlage benötigt. Analog wird ein Wert aus der entsprechenden Zeitverteilung ausgespielt, wenn in der Brandanalyse die Bedingung vorliegt, dass kein Rauch unter der Tür sichtbar ist (d. h. optische Dichte $\leq \kappa$). Aufgrund der unterschiedlichen Handlungsabläufe, die unter den verschiedenen Bedingungen stattfinden, unterscheiden sich die jeweiligen Zeitverteilungen, die über das Crew-Modul im Rahmen der Pre-Processing-Analyse ermittelt wurden.

Weitere, über das Crew-Modul berechnete Zeitverteilungen, die als aleatorische Unsicherheit in die MCDET-Analyse der Branddynamik eingebunden werden, sind z. B.:

- die Zeitspanne, die der Brandläufer (BL) benötigt, bis er den Handfeuerlöscher einsetzen kann. Diese Verteilung kommt nur zur Anwendung, wenn der BL den Brandraum so früh erreicht, dass die Rauchentwicklung noch relativ gering ist und der BL den Raum betreten kann,

- die Zeitspanne, bis die Löschgruppe vor Ort eintrifft und mit ihrer Löschausrüstung zur Brandbekämpfung einsatzbereit ist. Diese Verteilung kommt zur Anwendung, wenn entweder die Löschgruppe vor dem Brandläufer am Brandraum eintrifft oder wenn der BL vor der LG eintrifft, die Rauchentwicklung im Brandraum jedoch so hoch ist, dass der BL den Raum nicht betreten kann und sich die Feuerlöschanlage durch den BL nicht manuell auslösen lässt.

Die über das Crew-Modul berechneten Verteilungen werden als aleatorische Unsicherheiten aleatorische Unsicherheit in die MCDET-Analyse der Branddynamik eingebunden und kommen genau dann zur Anwendung kommen, wenn die entsprechenden Bedingungen vorliegen.

4.3 Ergebnisse

Im Rahmen der Pre-Processing-Analyse bzgl. des Brandbekämpfungsmodells für jede zugrunde gelegte Bedingung jeweils 100 dynamische Ereignisbäume erzeugt, wobei für jeden erzeugten dynamischen Ereignisbaum im Mittel 127 verschiedene Ablaufsequenzen berechnet wurden.

Für die Analyse des Brandszenarios unter Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmaßnahmen wurde der deterministische Brandsimulationscode FDS /MCG 13/ mit dem Werkzeug MCDET /KLO 06/ zur Durchführung einer probabilistischen Dynamikanalyse gekoppelt. Die weiterentwickelte Version von MCDET /KLO 14/ konnte in dieser Analyse noch nicht eingesetzt werden, da die Entwicklungsarbeiten in einem auch zeitlich-parallelen Arbeitspunkt des Vorhabens RS1198 durchgeführt wurden.

Im Rahmen der FDS/MCDET-Analyse wurden insgesamt 120 dynamische Ereignisbäume erzeugt, wobei ca. 2400 unterschiedliche Sequenzen berechnet wurden. Die unterschiedlichen Sequenzen ergeben sich aus den aleatorischen Unsicherheiten bzgl.

- aktiver Brandschutzeinrichtungen (Brandmeldeanlage funktioniert/defekt, Brandschutzklappe und Brandraumtüren schließen auslegungsgemäß ja/nein) und
- der menschlichen Handlungsabläufe zur Brandbekämpfung (z. B. Zeitverteilung, wann es dem Brandläufer gelingt, die FLA manuell auszulösen)

ergeben.

Das Brandszenario wurde bis 1800 s (30 Minuten) nach Brandentstehung berechnet. Neben dem Rechenzeitende von 1800 s nach Brandentstehung wurde der Löscherfolg als ein weiteres Abbruchkriterium definiert. Für den Erfolg der Löschung wird in der Analyse das Kriterium verwendet, dass eine Löschung des Brandes innerhalb 1800 s nach Brandentstehung stattfindet und die Temperatur an der Innenwand der Kabelummantelung 120 °C unterschreitet. Sobald bei einer Löschung die Innenwandtemperatur der Kabelummantelung 120 °C unterschreitet, wird der Rechenlauf beendet.

Für die parallele Ausführung der FDS/MCDET-Simulationsrechnungen wurden insgesamt 40 Rechenknoten eingesetzt, von denen 32 Rechenknoten von einem MS Windows HPC (High Performance Computing)-Cluster mit insgesamt 32 Rechenknoten zur Verfügung gestellt wurden. Die Simulationsrechnungen konnten in einem Zeitraum von ca. 1,5 Wochen durchgeführt werden.

Die MCDET-Analyse wurde nach einem Verfahren durchgeführt, das eine nachträgliche Durchführung einer approximativen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse erlaubt /PES 10/. Im Rahmen dieser Arbeit musste aus Zeitgründen auf eine approximative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse verzichtet werden. Sie kann aber anhand der vorliegenden Daten aus der MCDET-Analyse zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden.

Einfluss der Brandschutzklappe auf die Raumtemperaturen bzw. Temperaturen der Kabelmantelinnenwand

Im Folgenden soll gezeigt werden, welchen Effekt das fehlerhafte Nichtschließen der BSK auf die Brandentwicklung hat, wenn keine Löschung des Brandes durch das Personal erfolgt. In Abb. 4.2 sind die zeitlichen Verläufe der Raumtemperaturen und in Abb. 4.3 die zeitlichen Verläufe der Temperaturen der Innenwand des Kabelmantels (kurz als Kabeltemperatur bezeichnet) dargestellt. Die jeweiligen Temperaturverläufe ergeben sich unter Berücksichtigung der in Abschnitt 0 spezifizierten epistemischen Unsicherheiten. Die Temperaturverläufe wurden jeweils unter zwei verschiedenen Bedingungen berechnet,

– Bedingung 1:

Es findet keine Brandlöschung statt, und die Brandschutzklappe (BSK) schließt auslegungsgemäß, wenn die Schmelztemperatur des Schmelzlots erreicht wird. Des Weiteren befindet sich die Brandraumtür in geschlossenem Zustand.

– Bedingung 2:

Es findet keine Brandlöschung statt und die Brandschutzklappe bleibt fehlerhaft offen, wenn die Schmelzlottemperatur erreicht wird. Die Tür des Brandraums in den Flurbereich bleibt in geschlossenem Zustand.

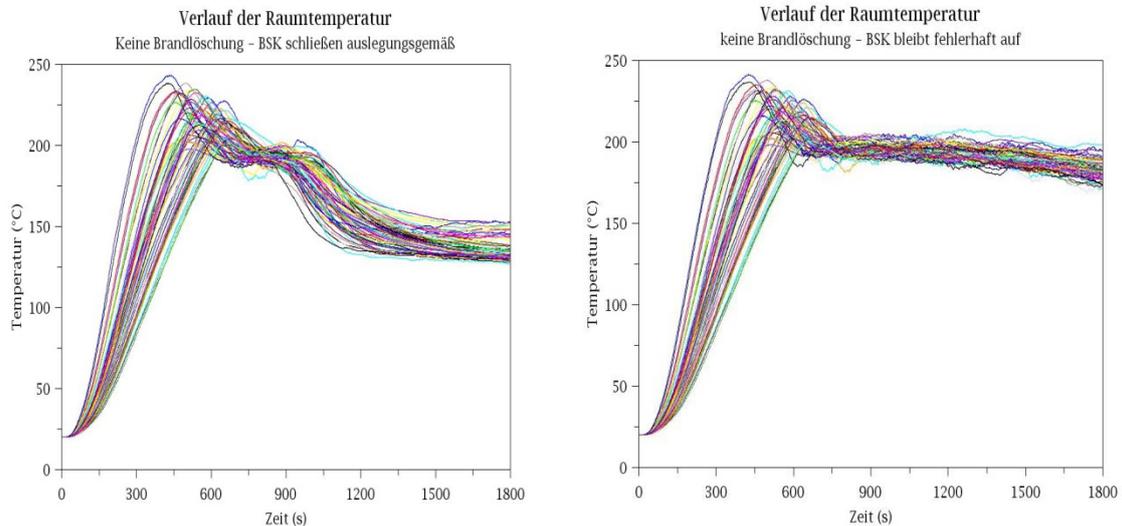


Abb. 4.2 Verläufe der Raumtemperaturen unter den Bedingungen, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw., dass die Brandschutzklappe fehlerhaft offen bleibt

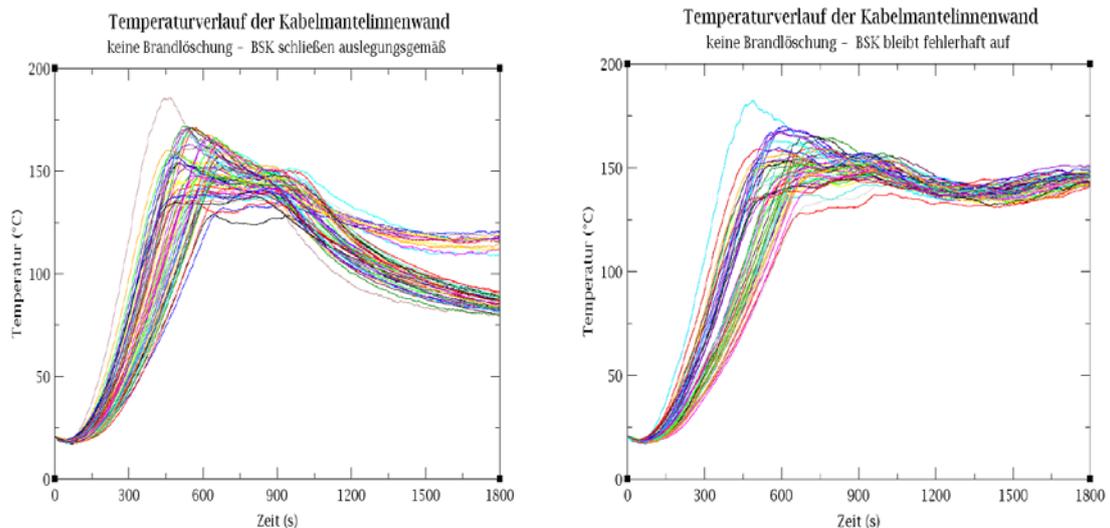


Abb. 4.3 Verläufe der Temperaturen der Kabelmantelinnenwand unter der Bedingung, dass Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw., dass die Brandschutzklappe fehlerhaft offen bleibt

Die Verläufe der Abbildungen Abb. 4.2 und Abb. 4.3 zeigen sowohl bzgl. der Raumtemperaturen als auch der Temperaturen der Kabelmantelinnenwand, dass bei auslegungsgemäßigem Schließen von BSK und geschlossener Brandraumtür die Temperatu-

ren nach Erreichen eines Temperaturmaximums wieder sinken, ohne dass eine Löschung des Brandes stattfindet. Die Raumtemperaturen fallen dabei nach ca. 20 Minuten (1200 s) auf Temperaturwerte zwischen 130 und 160 °C.

Bzgl. der Innenwand des Kabelmantels sinkt ein Teil der Temperaturverläufe nach Erreichen ihres Maximums auf ca. 105 °C – 120 °C ab, während bei einem anderen Teil der Verläufe ein etwas stärkeres Absinken der Temperaturen auf ca. 75 °C – 90 °C zu erkennen ist. Eine eingehende Untersuchung, durch welche Parameter die unterschiedlichen Entwicklungen des Temperaturverlaufes bewirkt werden, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Für diese Untersuchungen könnten multivariate statistische Verfahren (z. B. Diskriminanzanalyse) auf die Ergebnisse der MCDET-Analyse angewendet werden. Die dazu notwendige Vorgehensweise und einzusetzenden Programme müssten entsprechend erstellt werden.

Unter der Bedingung des fehlerhaften Offenbleibens der Brandschutzklappe fällt auf, dass die Raumtemperaturen und in der Folge auch die Kabelmantelinnentemperaturen nicht so stark absinken, sondern auf einem relativ hohen Niveau bleiben.

Bzgl. der erreichten maximalen Raum- bzw. Kabeltemperaturen lassen sich keine wesentlichen Unterschiede bzgl. des fehlerhaften Offenbleibens der Brandschutzklappe erkennen, wie aus den Quantilen der jeweiligen ermittelten bedingten Verteilungsfunktionen ersichtlich ist (siehe Tab. 4.5).

Tab. 4.5 Quantile der maximal erreichten Raum- und Kabeltemperaturen unter den Bedingungen, dass Brandschutzklappe und Brandraumtür auslegungsgemäß schließen bzw. die Brandschutzklappe fehlerhaft offen bleibt

Maximal erreichte Temperaturen [°C]					
		Raum		Kabelmantelinnenwand	
Quantile	BSK und Tür schließen	BSK bleibt fehlerhaft offen	BSK und Tür schließen	BSK bleibt fehlerhaft offen	
5 %	201	207	133	150	
50 %	226	231	141	154	
95 %	238	238	165	164	

Aus den vorliegenden Ergebnissen der MCDET-Analyse lassen sich auch detaillierte Angaben darüber machen, wie lange beispielsweise bestimmte Temperaturen über-

schritten werden. Dazu sollen im Folgenden die bedingten Verteilungsfunktionen der Zeitdauern berechnet werden, wie lange

- Raumtemperaturen > 200 °C bzw.
- Kabeltemperaturen > 150 °C

anstehen. Die bedingten Verteilungen sind in Abb. 4.4 und Abb. 4.5 grafisch dargestellt. Die Quantile dieser Verteilungen sind in Tab. 4.6 angegeben. Aus den Ergebnissen wird nicht nur deutlich, dass bei einem fehlerhaften Offenbleiben der BSK hohe Temperaturen über einen längeren Zeitraum anstehen, als in der Situation, in der die Brandschutzklappe des Brandraums auslegungsgemäß schließen. Es können zusätzlich auch die entsprechenden Zeitdauern quantifiziert werden, wie lange bestimmte Temperaturen in dem Brandszenario überschritten werden.

Tab. 4.6 Quantile der Zeitdauer, wie lange Raumtemperaturen > 200 °C bzw. Temperaturen der Kabelmantelinnenwand > 150 °C unter der Bedingung anstehen, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw. fehlerhaft offen bleibt

Zeitdauer wie lange Raumtemperaturen > 200 °C bzw. Temperaturen der Kabelmantelinnenwand > 150 °C anstehen [s]				
	Raum		Kabelmantelinnenwand	
Quantile	BSK schließt	BSK bleibt offen	BSK schließt	BSK bleibt offen
5 %	72	200	26	27
50 %	212	314	176	185
95 %	301	548	281	449

Unter der Bedingung, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt und keine Brandbekämpfung erfolgt, ist die Zeitdauer, wie lange eine Raumtemperatur von mehr als 200 °C ansteht, mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,95 nicht größer als ca. 5 Minuten. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,9 wird eine Raumtemperatur von 200 °C zwischen etwas über einer Minute (72 s) bis ca. 5 Minuten (301 s) überschritten.

Unter der Bedingung, dass die Brandschutzklappe fehlerhaft geöffnet bleibt und keine Brandbekämpfung erfolgt, steht eine Raumtemperatur von mehr als 200 °C mit einer

Wahrscheinlichkeit von 90 % zwischen ca. 3,5 Minuten (200 s) und ca. 9 Minuten (548 s) an, wie aus Abb. 4.4 bzw. Abb. 4.4 ersichtlich ist.

Bei den Kabeltemperaturen zeigt sich der Effekt insbesondere bei den höheren Verteilungswerten. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Temperatur der Kabelmantelinnenwand von mehr als 150 °C um mehr als 5 Minuten überschritten wird, beträgt im Fall, dass die BSK auslegungsgemäß schließt und keine Brandbekämpfung stattfindet, ca. 0,04. Im Fall, dass die BSK fehlerhaft geöffnet bleibt und keine Brandbekämpfung stattfindet, ist diese Wahrscheinlichkeit um den Faktor 7 größer und liegt bei ca. 0,30. Die Wahrscheinlichkeiten, dass Kabeltemperaturen > 150 °C um weniger als 3 Minuten anstehen, unterscheiden sich bzgl. der beiden Fälle kaum (siehe Abb. 4.5).

Verteilung der Zeit, wie lange Temperaturen > 200°C im Raum vorherrschen

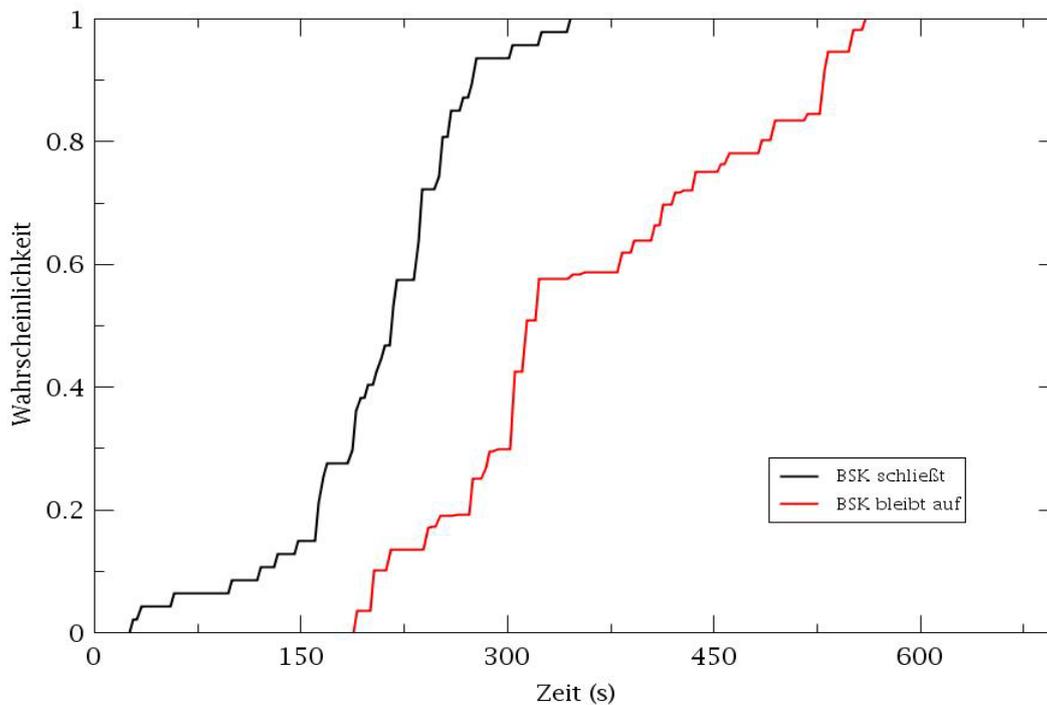


Abb. 4.4 Bedingte Verteilungen der Zeitdauern, wie lange Raumtemperaturen > 200 °C unter den Bedingungen anstehen, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw. fehlerhaft offen bleibt und keine Brandbekämpfung stattfindet

Diese länger andauernden hohen Raum- bzw. Kabeltemperaturen können einen wesentlichen Einfluss auf die Schätzung der Versagenswahrscheinlichkeit von Targets,

wie z. B. Kabel, haben. Dies wird an anderer Stelle ausführlicher diskutiert und anhand hypothetischer Beispiele demonstriert.

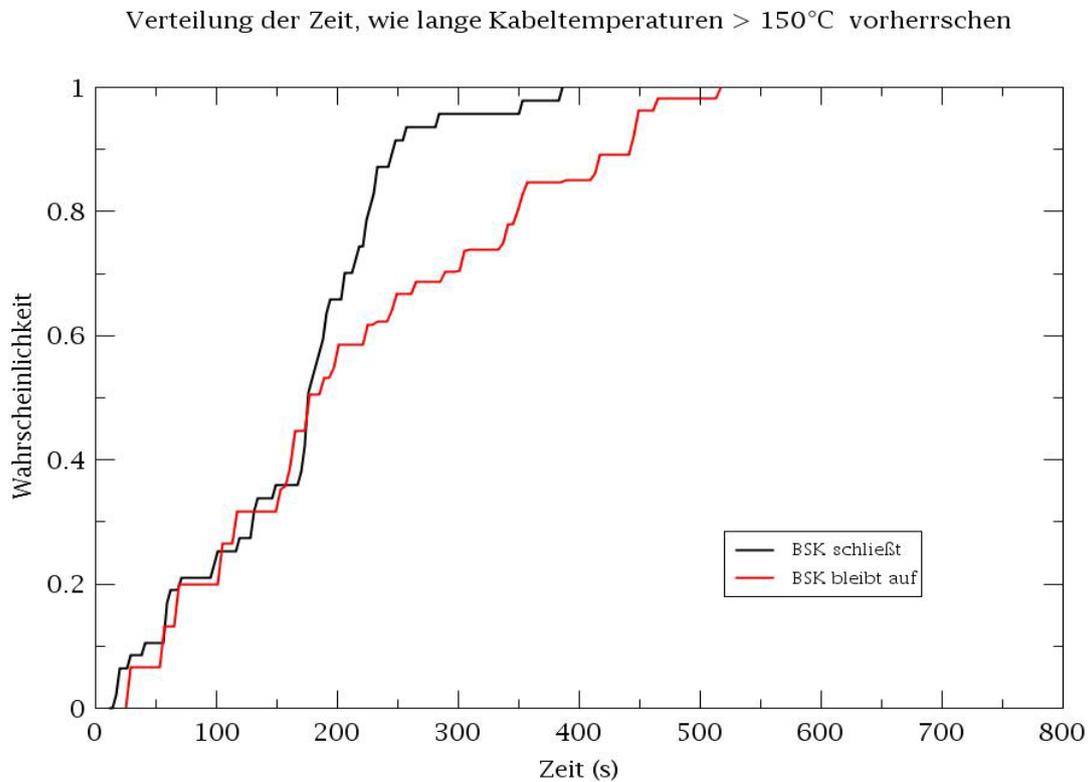


Abb. 4.5 Bedingte Verteilungen der Zeitdauern, wie lange Kabeltemperaturen $> 150^{\circ}\text{C}$ unter den Bedingungen anstehen, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw. fehlerhaft offen bleibt und keine Brandbekämpfung stattfindet

Die Besonderheit der Methode, mit der die Brandanalyse unter Verwendung von MCDET durchgeführt wurde, besteht darin, dass die Aktionen zur Brandbekämpfung durch das Analgenpersonal als dynamischer Prozess unter Verwendung des Crew-Moduls simuliert wurden. Damit können die Verteilungen von Zeiten bestimmt werden, wann bestimmte Handlungen durch das Personal unter der Bedingung verschiedener Situationen der Brandentwicklung durchgeführt werden (siehe Abschnitt 4.1). Diese über das Crew-Modul bestimmten Zeitverteilungen werden als aleatorische Unsicherheiten in das Modell zur Brandsimulation eingespeist, wodurch die Wechselwirkungen zwischen Brandentwicklung und Brandbekämpfung im Rahmen der FDS/MCDET-Analyse berücksichtigt werden können.

Da es sich um ein sehr schnell entwickelndes Brandszenario handelt, wird von dem Kriterium ausgegangen, dass die Brandbekämpfung innerhalb einer halben Stunde nach Brandentstehung durchgeführt werden soll. In der Analyse zur Brandbekämpfung haben sich folgende Situationen ergeben:

Keine Brandlöschung

Der Fall beschreibt die Situation, dass die Brandbekämpfungsmaßnahmen durch das Anlagenpersonal im gegebenen Zeitraum nicht erfolgreich sind und somit keine Löschung des Brandes innerhalb von 1800 s nach Brandentstehung durch das Anlagenpersonal stattfindet. Dies kann sich durch folgende Situationen ergeben:

Sofern die Brandmeldeanlage verfügbar ist, kann die Situation eintreten, dass der BL vor der Feuerwehr den Brandraum erreicht, der BL die FLA aber nicht manuell auslösen kann, wenn die Rauchentwicklung so stark ist, dass er den Brandraum nicht betreten kann, um den Brand mit dem Handfeuerlöscher zu löschen. Wenn der BL die FLA nicht auslösen kann, muss er warten, bis die Feuerwehr eintrifft, die den Brand mit ihrer Löschausrüstung bekämpft. Dabei kann es vorkommen, dass die Feuerwehr die Löschung nicht innerhalb von 1800 s nach Eintreffen des Brandalarms in der Warte beginnen kann. Gründe dieser Verzögerung können beispielsweise sein, dass die Personen der LG fälschlicherweise zuerst einen falschen Raum aufgesucht haben oder Recovery-Maßnahmen notwendig sind, wenn z. B. die Löschausrüstung defekt ist.

Die Löschung durch die Feuerwehr ist allerdings nur dann gefordert, wenn entweder die LG vor dem BL den Brandraum erreicht oder es dem BL nicht möglich ist, den Brand durch manuelle Auslösung der im Brandraum installierten Feuerlöschanlage zu löschen oder mit dem Handfeuerlöscher die Brandbekämpfung durchzuführen. Die Löschung mit dem Handfeuerlöscher ist nur dann möglich, wenn der BL den Brandraum so früh erreicht, dass die Rauchentwicklung noch nicht sehr weit fortgeschritten ist und der BL den Brandraum ohne sich zu gefährden betreten kann.

Bzgl. des in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen und mit dem Crew-Modul simulierten Handlungsablaufs hat sich ergeben, dass bei Verfügbarkeit der Brandmeldeanlage die Löschung des Brandes mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit von $5.97 \cdot 10^{-6}$ nicht innerhalb von 1800 s nach Brandeintritt beginnt und damit die Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal nicht erfolgreich ist. Der Grund dafür liegt in den Ereignissen, dass der BL die Feuerlöschanlage nicht manuell aktivieren konnte und zusätzlich Recovery-

Aktionen der LG notwendig sind, wenn die Löschausrüstung defekt ist oder andere unvorhergesehene Ereignisse eintreten. Diese Situationen treten allerdings mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit auf. Das 95 %-Konfidenzintervall der mittleren Wahrscheinlichkeit ist gegeben durch (4,8 E-06, 7,1 E-06).

Im Fall, dass die Brandmeldeanlage nicht verfügbar ist ($p = 5,0 \text{ E-}03$) ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Rundgänger den Brandraum nach der Brandentstehung rechtzeitig erreicht, um eine erfolgreiche Brandbekämpfung einzuleiten, relativ gering. Die Simulationsrechnungen mit dem Crew-Modul haben ergeben, dass der RG nicht später als ca. 28 Minuten nach Brandentstehung den Brand erkannt haben muss, damit überhaupt die Möglichkeit gegeben ist, eine erfolgreiche Brandbekämpfung innerhalb einer halben Stunde nach Brandentstehung durchführen zu können. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Rundgänger während seiner achtstündigen Schicht zufällig innerhalb von 28 Minuten nach Brandentstehung am Brandraum ankommt und den Brand erkennt, ist mit $5,8 \text{ E-}02$ sehr gering. D. h., im Fall einer defekten Brandmeldeanlage, sind die Möglichkeiten einer Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal sehr beschränkt. Aus diesem Grund soll für diesen Fall auf eine vertiefte Analyse verzichtet werden.

Zusammenfassend werden in Tab. 4.7 die Wahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Situationen aufgeführt, in denen die Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal nicht innerhalb 1800 s nach Brandeintritt durchgeführt werden kann und somit die Brandbekämpfung nicht erfolgreich ist. Es ist an dieser Stelle nochmals ausdrücklich zu betonen, dass die Werte unter der Bedingung ermittelt wurden, dass ein Brand entsteht und die automatische Auslösung der im Brandraum installierten stationären Feuerlöschanlage nicht funktioniert hat.

Tab. 4.7 Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Situationen, in denen die Löschung des Brandes nicht innerhalb von 1800 s nach Brandentstehung durch das Anlagenpersonal beginnt

Situation	Wahrscheinlichkeit	95 %- Konfidenzintervall
<ul style="list-style-type: none"> – Brandmeldeanlage verfügbar und – Löschung beginnt nicht innerhalb von 1800 s nach Brandentstehung 	5,94 E-06	(4,78 E-06, 7,06 E-06)

Situation	Wahrscheinlichkeit	95 %- Konfidenzintervall
<ul style="list-style-type: none"> – Brandmeldeanlage nicht verfügbar und – RG erreicht den Brandraum während seiner Schicht nicht innerhalb 1800 s nach Brandentstehung -> keine Brandbekämpfung innerhalb 1800 s nach Brandentstehung 	4,68 E-03	
<ul style="list-style-type: none"> – Brandmeldeanlage nicht verfügbar und – RG erreicht den Brandraum während seiner Schicht innerhalb 1800 s nach Brandentstehung aber – die Zeit reicht nicht aus, so dass die Löschung des Brandes nicht innerhalb 1800 s nach Brandentstehung beginnen kann 	1,95 E-05	(4,69 E-06, 3,41 E-05)
Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal nicht erfolgreich	4,7 E-03	

Die Ergebnisse in Tab. 4.7 zeigen, dass insbesondere eine Situation den Hauptbeitrag dazu liefert, dass die Löschung des Brandes durch das Anlagenpersonal nicht innerhalb 1800 s nach Brandentstehung beginnen kann. Diese Situation ist dadurch gekennzeichnet, dass die Brandmeldeanlage nicht auslegungsgemäß funktioniert und der Rundgänger während seiner Schicht mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von $9,35 \text{ E-}01$ nicht innerhalb von 1800 s nach Brandentstehung am Brandraum ankommt. Die Konsequenz ist, dass bei einem Ausfall der Brandmeldeanlage das Anlagenpersonal kaum eine Chance hat, eine erfolgreiche Brandbekämpfung durchzuführen.

Bei funktionierender Brandmeldeanlage ist die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal allerdings sehr hoch ($> 99,99 \%$). D. h., die relativ hohe Wahrscheinlichkeit von $4,7 \text{ E-}03$, dass die Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal nicht erfolgreich durchgeführt wird, ist maßgeblich von der Zuverlässigkeit der Brandmeldeanlage bestimmt. Aber auch durch organisatorische Maßnahmen bzgl. des Rundgängers könnten die Möglichkeiten einer erfolgreichen Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal im Falle einer defekten Brandmeldeanlage verbessert werden. Dazu könnten mit dem Crew-Modul verschiedene strategische Alternativen simuliert und deren Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Brandbekämpfung quantifiziert werden.

Brandläufer löscht erfolgreich durch manuelle Auslösung der Feuerlöschanlage

Eine der Brandbekämpfungsmaßnahmen besteht darin, dass der BL die Löschung durch die manuelle Aktivierung der im Brandraum installierten Feuerlöschanlage (FLA) beginnt. Für die Analyse wurde angenommen, dass die FLA nach der Brandentstehung nicht automatisch ausgelöst wurde.

Die manuelle Aktivierung der FLA durch den BL erfolgt in der Situation, wenn der BL den Brandraum erreicht und die Rauchentwicklung des Brandes entweder so groß ist, dass der BL Rauch unter der Brandraumtür in den Flurbereich austreten sieht, oder die Rauchentwicklung im Brandraum so groß ist, dass der BL den Raum nicht betreten kann. In dem Fall, dass die Rauchentwicklung bereits so stark ist, dass der BL den Brandraum nicht betreten kann, ist die mittlere Wahrscheinlichkeit $6,0 \cdot 10^{-3}$, dass der BL die Brandbekämpfung durch die manuelle Auslösung der FLA nicht durchführen kann.

Wichtig ist im Zusammenhang mit der Brandbekämpfung die Frage, wann der BL in der Lage ist, die FLA manuell zu aktivieren. Das Ziel einer jeden Brandbekämpfung ist, dass die Löschung möglichst schnell nach dem Ausbruch des Brandes beginnen kann. Wenn der BL die FLA manuell auslöst, dann geschieht dies

- mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 90 % zwischen 4 und 10 Minuten,
- mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 8 % zwischen 10 und 12 Minuten

nach dem Eintreffen des Brandalarms in der Warte. In sehr seltenen Fällen, die mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit von ca. 2 % vorkommen, kann die Zeit, bis der BL die FLA manuell ausgelöst hat, auch zwischen 12 und 15 Minuten liegen. Die längeren Zeitdauern ergeben sich dadurch, dass der BL z. B. irrtümlich einen falschen Raum aufsucht und sich nach Rücksprache mit dem SL zum richtigen Raum begibt oder er sich zufällig an einem Ort in der Anlage befindet, von dem er eine relativ lange Zeit benötigt, um zum Brandraum zu gelangen.

Brandläufer löscht erfolgreich mit Handfeuerlöscher

Wenn der BL sehr früh am Brandraum ankommt, kann es sein, dass sich der Brand noch nicht so weit entwickelt hat, dass der BL den Raum betreten kann, um den Brand mit dem Handfeuerlöscher zu bekämpfen. Ob der BL den Raum betreten kann, wird durch den Grad der Verrauchung bestimmt, der im Raum zum betreffenden Zeitpunkt

vorliegt. Zur Bewertung der Verrauchung wird die Prozessgröße 'Optical Density' (optische Dichte) verwendet, die in einer mittleren Raumhöhe gemessen wird. Die Prozessgröße 'Optical Density' liefert ein Maß der Rauchdichte pro Meter an der gemessenen Stelle. Als Kriterium dafür, ob Rauch unter der Tür zum Flur sichtbar ist oder nicht, wurde für die optischen Dichte ein kritischer Wert κ im Raum angenommen, der aus einer Gleichverteilung zwischen 0,3 und 0,5 ausgespielt wurde (siehe Abschnitt 2.2.2). D. h., wenn der BL den Brandraum erreicht hat und die optische Dichte den Wert κ unterschreitet, wird von der Situation ausgegangen, dass der BL den Raum betritt, um mit dem HFL den Brand zu bekämpfen.

Der Zeitpunkt, wann der BL am Brandraum ankommt liegt mit ca. 99 %-iger Wahrscheinlichkeit zwischen 3 und 10 Minuten. Die Simulationen des Brandszenarios haben ergeben, dass bereits 3 Minuten nach Brandentstehung die Rauchentwicklung so stark ist, dass die optische Dichte den Wert 0,5 übersteigt. D. h., wenn der BL den Brandraum erreicht, ist die Rauchentwicklung bei dem unterstellten Brandszenario bereits so groß, dass der BL den Raum nicht betreten wird, um den Brand mit dem HFL zu bekämpfen.

Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

Die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr (bzw. Löschgruppe) findet nur dann statt, wenn entweder

- der BL vor der Löschgruppe (LG) am Brandraum angekommen ist, aber die Feuerlöschanlage im Raum nicht manuell auslösen konnte. In diesem Fall bleibt dem BL nichts anderes übrig, als auf die LG zu warten. Wie oben beschrieben, ist zu diesem Zeitpunkt die Rauchentwicklung zu hoch, als dass der BL den Raum betreten könnte, um den Brand mit dem HFL bekämpfen zu können.
- oder die LG kommt vor dem BL am Brandraum an und beginnt, den Brand zu bekämpfen. Sofern die LG vor dem BL am Brandraum ankommt und Rauch unter der Brandraumentür austreten sieht, wird die LG zunächst versuchen, die FLA manuell auszulösen. In den Brandsimulationen ist jedoch kein Fall aufgetreten, in denen die LG vor dem BL am Brandraum eingetroffen ist.

Unter der Bedingung, dass der BL die Brandbekämpfung nicht durchführen kann und die Brandbekämpfung durch die Löschgruppe durchgeführt werden muss, ist die mittlere Wahrscheinlichkeit $6,38 \text{ E-}04$, dass die LG den Brand nicht innerhalb einer halben

Stunde nach Brandentstehung löschen kann. Das 95 %-Konfidenzintervall der mittleren Wahrscheinlichkeit ist gegeben durch (5,47 E-04, 7,32 E-04).

Unter der Bedingung, dass der BL die Brandbekämpfung nicht durchführen kann und diese durch die Löschgruppe durchgeführt werden muss, dann liegen die Zeiten, wann die LG am Brandraum eintrifft, mit ca. 95 %-iger Wahrscheinlichkeit zwischen 11 und 16 Minuten. Davon benötigen die Personen der LG zwischen 3 und 8 Minuten, um sich am Eingang des Kontrollbereichs zu sammeln und zwischen 4 und 6 Minuten, ihre vorbereitenden Arbeiten abzuschließen. Dies sind die Hauptbeiträge zu den Zeiten, wann die LG den Brandraum erreicht. Die Zeit, die die LG für den Weg vom Kontrollbereich bis zum Brandraum benötigt, beträgt zwischen 45 und 75 s für den Fall, dass sich die LG direkt zum richtigen Raum begibt. Sucht die LG aufgrund von Missverständnissen in der Kommunikation zuerst einen falschen Raum auf und begibt sich erst nach Rücksprache mit dem SL zum richtigen Brandraum, dann beträgt die Zeit, die die LG vom Eingang des Kontrollbereichs bis zum Brandraum benötigt, zwischen 5 und 10 Minuten. Diese Situation trägt im Wesentlichen dazu bei, dass sich in den Simulationen Zeiten bis zu 22 Minuten nach Brandentstehung ergeben haben, die die LG benötigt, um den Brandraum zu erreichen. Diese sehr langen Zeiten treten allerdings mit relativ geringen Wahrscheinlichkeiten $< 3,0 \text{ E-}02$ auf.

Einfluss verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen auf die maximal erreichten Raumtemperaturen

Im Folgenden wird dargestellt, welchen Einfluss die Brandbekämpfungsmaßnahmen auf die maximal erreichten Raumtemperaturen und Temperaturen der Kabelmantelinnenwand haben. Dazu werden in Abb. 4.6 die Verteilungen der maximal erreichten Raumtemperaturen grafisch dargestellt und in Tab. 4.8 die entsprechenden Quantile der bedingten Verteilungen angegeben, die bzgl. verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen ermittelt wurden. Die bei der Ermittlung der bedingten Verteilungen zugrunde gelegten Bedingungen sind:

- Ohne Brandbekämpfung, d. h. es findet keine Löschung des Brandes statt.
- Die Löschgruppe (LG) bekämpft den Brand mit ihrer Löschausrüstung.
- Der Brandläufer (BL) löscht den Brand durch manuelle Aktivierung der im Brandraum installierten Feuerlöschanlage. Dies setzt voraus, dass der BL das Ventil manuell öffnen kann.

- In dem seltenen Fall, dass die Brandmeldeanlage ausfällt, ist der RG, der zu einem zufälligen Zeitpunkt am Brandraum ankommt, die einzige Möglichkeit den Brand zu entdecken und die Bekämpfung des Brandes einzuleiten. Der Rundgänger (RG) löscht den Brand durch manuelle Auslösung der im Brandraum installierten Feuerlöschanlage, wenn bei seiner Ankunft am Brandraum die Rauchentwicklung so hoch ist, dass er den Raum nicht betreten kann. Für die Simulation der Brandbekämpfung durch den RG wurde angenommen, dass der RG während seiner Schicht innerhalb einer halben Stunde nach Brandentstehung den Brandraum erreicht. Diese Situation tritt mit einer Wahrscheinlichkeit von $6,25 \cdot 10^{-2}$ ein.
- Der RG löscht den Brand mit dem Handfeuerlöscher (HFL). Diese Situation setzt voraus, dass der RG zufälligerweise kurz nach der Entstehung des Brandes am Brandraum ankommt und sich der Brand noch nicht so weit entwickelt hat, dass der RG den Raum betreten kann und die Brandbekämpfung mit dem HFL durchführt.

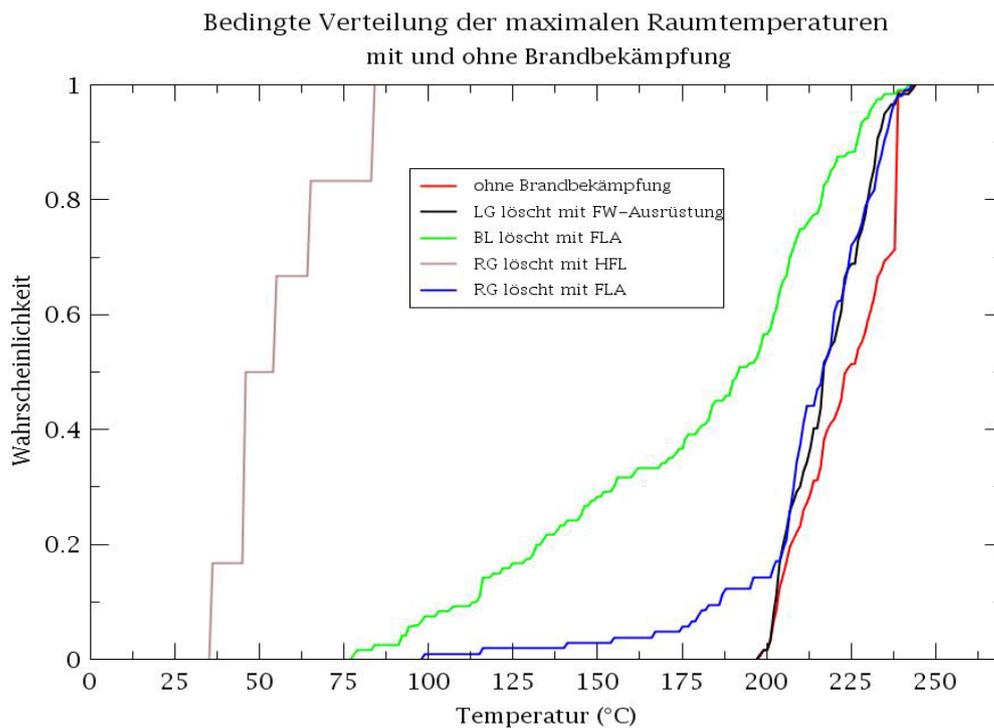


Abb. 4.6 Bedingte Verteilungen der maximalen Raumtemperaturen unter verschiedenen Bedingungen der Brandbekämpfung

Tab. 4.8 Quantile der bedingten Verteilungen der maximal erreichten Raumtemperaturen unter der Bedingung verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen

		Quantile der maximal erreichten Raumtemperaturen [°C]		
Quantile		5 %	50 %	95 %
Bedingung				
	Ohne Brandbekämpfung	201	223	238
	LG löscht mit FW-ausrüstung	201	217	235
	BL löscht durch manuelle Auslösung der FLA	93	191	230
	RG löscht durch manuelle Auslösung der FLA	174	216	237
	RG löscht mit HFL	35	54	83

Wenn die LG den Brand mit ihrer Löschausrüstung bekämpft, hat dies kaum Einfluss auf die maximal erreichten Raumtemperaturen. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die LG relativ spät den Brandraum erreicht und die Brandbekämpfung beginnen kann. Wenn die LG den Brandraum erreicht, dann geschieht dies mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % zwischen 11 und 16 Minuten nach der Brandentstehung. Bevor die LG mit der Löschung beginnen kann, benötigt sie noch eine gewisse Zeit, um ihre Ausrüstung zur Löschung vorzubereiten. Die Zeitpunkte der maximalen Raumtemperaturen werden jedoch mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit innerhalb der ersten 11 Minuten nach Brandbeginn erreicht.

Der Effekt der Brandlöschung durch den BL, der die FLA manuell auslöst, ist insbesondere dann signifikant, wenn der BL frühzeitig den Brandraum erreicht und die FLA manuell aktivieren kann. Wenn der BL die Löschung durch die FLA vornimmt, dann geschieht dies mit einer Wahrscheinlichkeit von 56 % so früh, dass die Raumtemperatur von 200 °C nicht überschritten wird.

Bzgl. der Brandbekämpfung durch den Rundgänger (RG) wirken sich die Zufallszeitpunkte aus, wann der RG den Brandraum erreicht und den Brand entdeckt. Da in dem modellierten Brandszenario die maximalen Raumtemperaturen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % vor 10 Minuten erreicht werden, kann der RG nur dann einen Einfluss

auf die Maximaltemperatur haben, wenn er während der ersten 10 Minuten nach der Brandentstehung am Brandraum ankommt. Dies geschieht mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,33 unter der Bedingung, dass der RG innerhalb der ersten halben Stunde nach Brandentstehung zum Brandraum kommt. Aus Abb. 4.6 ist zu erkennen, dass durch den Einsatz des Rundgängers mit einer bedingten Wahrscheinlichkeit von ca. 14 % die Raumtemperaturen $< 200 \text{ °C}$ gehalten werden können. Ohne Brandbekämpfung sind die maximal erreichten Raumtemperaturen zu 99 % $> 200 \text{ °C}$.

Die extrem niedrigen Raumtemperaturen, die sich ergeben, wenn der RG mit dem Handfeuerlöscher (HFL) die Brandbekämpfung durchführt, ist darin begründet, dass der RG nur dann mit dem HFL den Raum betreten kann, wenn die Brandentwicklung noch nicht sehr weit fortgeschritten ist und demzufolge der RG zufälligerweise zu einem sehr frühen Zeitpunkt (< 3.5 Minuten) den Brand entdecken muss. In den Fällen, in denen der RG mit dem HFL den Brand bekämpft, erreicht er den Brandraum zufällig zwischen 1,5 und 3 Minuten nach Brandentstehung. Zu diesem Zeitpunkt sind die Temperaturen noch nicht soweit gestiegen und weisen bzgl. dieser Brandbekämpfung entsprechend niedrige maximale Raumtemperaturen auf.

Einfluss der Brandbekämpfung auf die Kabelmantelinnentemperatur

In Abb. 4.7 werden die Verläufe der Temperaturen der Kabelmantelinnenwand in Abhängigkeit verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen, d. h.

- keine Löschung innerhalb 1800 s nach Brandentstehung,
- Löschung durch den Brandläufer (BL).
- Löschung durch die Feuerwehr (LG)

und unter Berücksichtigung der epistemischen Unsicherheiten bzgl. der Parameter des FDS-Modells (siehe Abschnitt 3.1.2) dargestellt. Die Brandbekämpfungsmaßnahmen beziehen sich auf die Situation, dass die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert hat.

Kabelmantelinnentemperatur

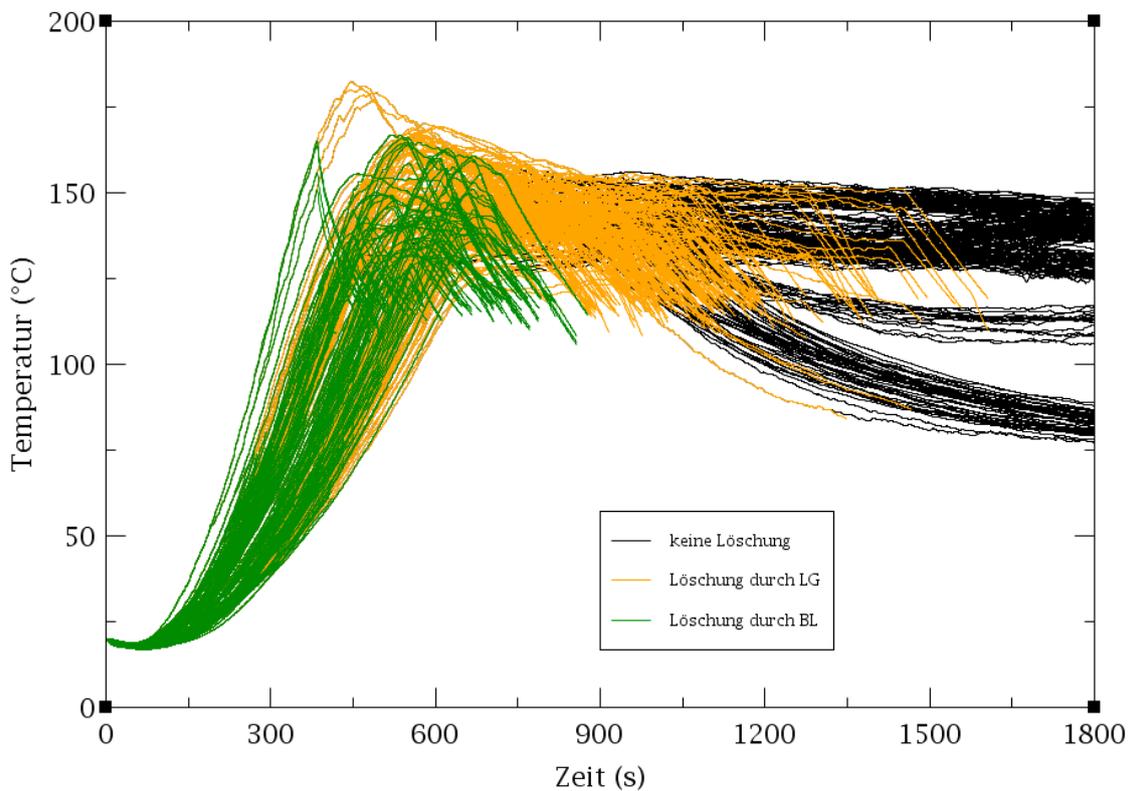


Abb. 4.7 Temperaturverlauf der Kabelmantelinnenwand in Abhängigkeit verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen und epistemischen Unsicherheiten

Im Fall, dass keine Löschung des Brandes innerhalb 1800 s nach Brandentstehung erfolgt (schwarze Kurven in Abb. 4.7, sind drei unterschiedliche Bänder (Cluster) von Temperaturverläufen zu erkennen. Im ersten Cluster fallen die Temperaturen ca. 20 Minuten nach Brandentstehung auf Werte zwischen 75 °C und 90 °C, obwohl keine Löschung des Brandes durch das Anlagenpersonal stattfindet. Bei diesen Temperaturverläufen hat die Brandschutzklappe auslegungsgemäß geschlossen, nachdem die Schmelzlottemperatur von 72 °C erreicht wurde, die Türen des Brandraums waren geschlossen.

Im zweiten Cluster fällt die Senkung der Temperatur etwas geringer aus, wobei sich nach ca. 20 Minuten die Kabelmantelinnentemperaturen zwischen 105 °C und 120 °C einstellen. Auch bzgl. dieser Verläufe hat die Brandschutzklappe auslegungsgemäß geschlossen, nachdem die Schmelzlottemperatur von 72 °C erreicht wurde, und die Türen des Brandraums waren geschlossen. Hier spiegelt sich der Effekt wieder, der

weiter oben erwähnt wurde und im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden konnte.

Im dritten Cluster schwächen sich die Kabeltemperaturen nach Erreichen ihrer Maximalwerte zwar etwas ab, verweilen jedoch bis zum Rechenzeitende auf einem relativ hohen Level zwischen 125 °C und 150°C. Das Beibehalten der hohen Temperaturen der Kabelmantelinnenwand wird dadurch beeinflusst, dass entweder eine BSK fehlerhaft nicht schließt, wenn die Schmelzlottemperatur erreicht wird, und/oder die Tür des Brandraums nicht schließt, wenn die Tür durch den BL geöffnet wird, um die Situation im Brandraum einzuschätzen.

Die Verläufe, in denen die Brandlöschung durch die Löschgruppe stattfindet, sind durch die orangefarbenen Kurven in Abb. 4.7 gekennzeichnet. In diesen Verläufen ist zu erkennen, dass durch die Löschung der Feuerwehr die Temperaturen der Kabelmantelinnenwand in den meisten Fällen zwischen 14 und 20 Minuten nach Brandentstehung auf unter 120°C gesenkt werden können. In wenigen Fällen, z. B. wenn die Löschgruppe aufgrund von notwendigen Recovery-Aktionen den Brandraum erst zu einem späten Zeitpunkt erreicht, erfolgt die Löschung erst später als 20 Minuten nach der Brandentstehung. Aus den Verläufen ist ersichtlich, dass die Löschung der Feuerwehr, insbesondere gegenüber der Temperaturverläufe des Clusters 3, zu einer signifikant früheren Senkung der Kabeltemperaturen führt. Gegenüber der Temperaturverläufe in Cluster 1 und 2 ist der Einfluss der Löschung durch die Feuerwehr nicht so bedeutend, da in diesen Fällen die Temperaturen in dem entsprechenden Zeitrahmen auch ohne Löschung unter 120 °C absinken.

Die Verläufe, bei denen eine Löschung durch den Brandläufer stattfindet, sind in der Abb. 4.7 durch die grünen Kurven dargestellt. Gegenüber der Löschgruppe erhält man durch die Löschung des Brandläufers eine weitere Reduzierung des Zeitpunktes, wann die Kabeltemperatur auf unter 120 °C gesenkt werden kann. Da der Brandläufer in den meisten Fällen den Brandraum eher erreicht, als die Mannschaft der Löschgruppe, wird er den Brand auch eher löschen können, falls er die Feuerlöschanlage im Brandraum manuell aktivieren kann. In Abb. 4.7 ist zu erkennen, dass durch den Brandläufer eine signifikant frühere Senkung der Kabeltemperaturen gegenüber der Löschgruppe erreicht werden kann.

Anhand Abb. 4.7 konnten bisher allein aus den Temperaturverläufen bzgl. verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen wichtige Informationen abgeleitet werden. Eine besondere Eigenschaft einer MCDET-Analyse liegt jedoch darin, dass zu jeder der in

Abb. 4.7 dargestellten Kurve entsprechende Ereignisse zugeordnet sind, die zu dem jeweiligen Temperaturverlauf geführt haben und jedem Temperaturverlauf eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet ist, mit der dieser Temperaturverlauf eintritt. Aus diesen Informationen lassen sich verschiedenste probabilistische Aussagen ableiten, die für eine probabilistische Sicherheitsanalyse relevant sein können.

Aus Abb. 4.7 konnten ungefähre Zeitintervalle angegeben werden, wann der Brand durch die Feuerwehr bzw. den Brandläufer gelöscht wird. Durch die Eigenschaften der MCDET-Analyse können diese Zeitangaben genauer bestimmt werden. Dazu sind in Abb. 4.8 die Verteilungen Zeit dargestellt die von Brandentstehung bis zur Löschung des Brandes vergeht. Die Verteilungen wurden unter den Bedingungen ermittelt, dass die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert und dass die Löschung durch die Feuerwehr bzw. des Brandläufers erfolgt. Zum Vergleich wird auch die Verteilung der Zeit dargestellt, wann die Kabelmantelinnentemperatur ohne Löschung unter 120 °C sinkt.

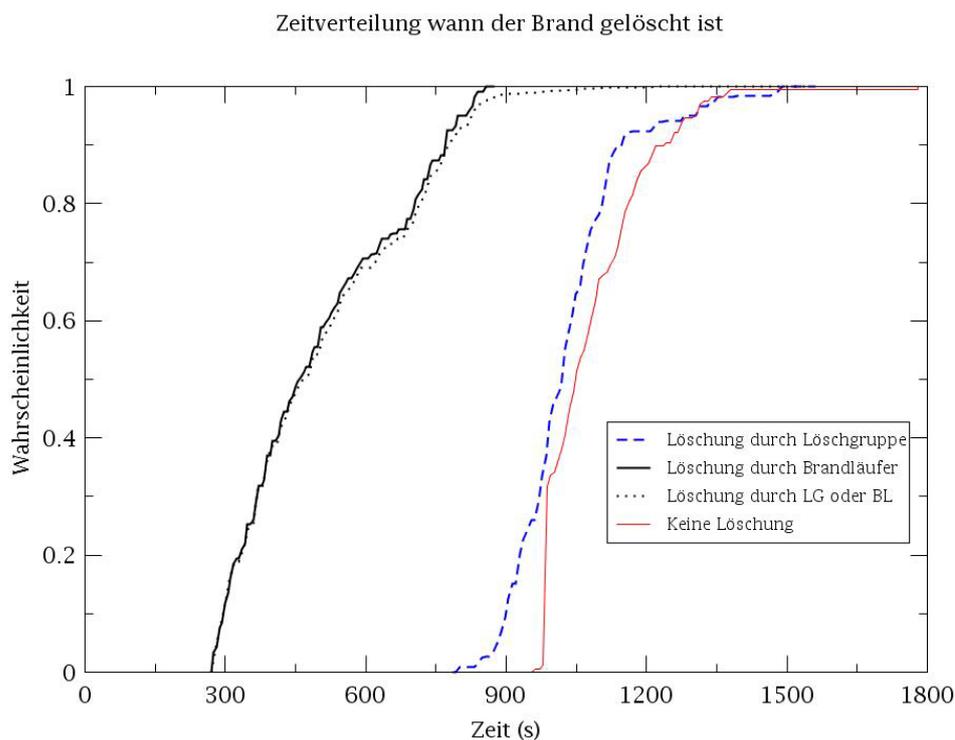


Abb. 4.8 Verteilung der Zeit von Brandentstehung bis zur Löschung des Brandes

Die bedingten Verteilungen in Abb. 4.8 bestätigen, was sich in Abb. 4.7 bereits angedeutet hat. Der zeitliche Gewinn, den die Feuerwehr gegenüber der Situation erreicht, dass die Kabeltemperatur unter 120 °C sinkt, sofern keine Brandlöschung stattfindet, ist mit ca. 0,5 – 1,5 Minuten relativ gering. Allerdings sinken in den Situationen, in de-

nen entweder die Brandschutzklappe oder die Tür des Brandraums fehlerhaft nicht schließt und keine Löschung stattfindet, die Temperaturen der Kabelmantelinnenwand nicht unter 120 °C. D. h. in diesen Fällen stehen Temperaturen der Kabelmantelinnenwand von > 120 °C bis zu 1800 s an. In diesen Fällen kann durch die Löschung der Feuerwehr die Kabeltemperatur um ca. 7 – 13 Minuten früher auf < 120 °C gebracht werden kann. In diesen kritischen Situationen, die jedoch mit relativ geringer Wahrscheinlichkeit eintreten, hat die Löschung durch die Feuerwehr einen signifikanten Einfluss auf den Zeitpunkt, wann die Kabeltemperatur gesenkt werden kann.

Abb. 4.8 zeigt, dass der Brand durch den Brandläufer gegenüber der Feuerwehr signifikant früher gelöscht werden kann. Wenn der Brandläufer den Brand löscht, dann erfolgt dies mit einer Wahrscheinlichkeit von $7,10 \cdot 10^{-1}$ innerhalb von 10 Minuten und mit einer Wahrscheinlichkeit von $9,20 \cdot 10^{-1}$ innerhalb 13 Minuten nach Brandentstehung. Wenn die Löschung nicht durch den Brandläufer erfolgen kann, (z. B. da der BL es nicht schafft, die Feuerlöschanlage manuell zu aktivieren), muss die Löschung durch die Löschgruppe durchgeführt werden. Wenn die Feuerwehr die Löschung des Brandes durchführt, dann erfolgt dies mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % zwischen 13 und 22 Minuten nach Brandentstehung.

Die bedingte Verteilung, wann die Brandbekämpfung insgesamt erfolgreich durchgeführt wird, d. h. die Löschung des Brandes erfolgt durch den BL oder durch die Löschgruppe, ist annähernd gleich der bedingten Verteilung für den BL. Dies ist damit zu begründen, dass die Feuerwehr nur dann zur Löschung des Brandes kommt, wenn der BL nicht erfolgreich ist. Diese Wahrscheinlichkeit ist jedoch mit $6,0 \cdot 10^{-3}$ sehr gering. D. h. in die Zeitverteilung der Brandlöschung durch den BL oder durch die LG geht die Verteilung des BL mit einem Gewicht von $9,94 \cdot 10^{-1}$ und die Verteilung der LG mit einem Gewicht von $6,0 \cdot 10^{-3}$ ein. Deshalb ist die Verteilung für BL oder LG annähernd gleich der Verteilung des BL.

Ein weiterer signifikanter Effekt der Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal ist in Bezug auf die maximal erreichten Kabelmantelinnentemperaturen zu erkennen. Dazu sind in Abb. 4.9 sind die Verteilungen der maximal erreichten Temperaturen der Kabelmantelinnenwand (kurz Kabeltemperatur genannt) unter den Bedingungen dargestellt, dass die Brandlöschung durch BL oder LG erfolgreich bzw. nicht erfolgreich durchgeführt werden kann.

Unter der Bedingung, dass keine Löschung des Brandes erfolgt, werden Maximaltemperaturen der Kabelmantelinnenwand von 130 °C – 190 °C erreicht. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegen die maximal erreichten Temperaturen zwischen 130 °C und 172 °C.

Wenn der Brand entweder durch den Brandläufer oder durch die Löschgruppe gelöscht wird kann eine signifikante Senkung der Maximaltemperaturen erreicht werden. Durch die Brandbekämpfung des Analgenpersonals kann erreicht werden, dass die Kabeltemperaturen mit 75 %iger Wahrscheinlichkeit unter 140 °C, mit 55 %iger Wahrscheinlichkeit unter 120 °C und mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,44 sogar unter 100 °C gehalten werden können. Den Hauptanteil des Effekts hat dabei der BL, der den Brandraum erheblich früher als die LG erreicht und demzufolge den die Löschung des Brandes entsprechend früher als die LG durchführen kann (siehe Abb. 4.8), wodurch die erreichten Maximaltemperaturen der Kabelmantelinnenwand niedriger ausfallen.

Da die LG entsprechend spät den Brandraum erreicht, hat die Löschung durch die LG relativ wenig Einfluss auf die erreichten Maximaltemperaturen. Die bedingte Verteilung entspricht ungefähr derjenigen Temperaturverteilung, die sich ergibt, wenn die Brandbekämpfung nicht erfolgreich ist. Dabei ist allerdings zu betonen, dass auch im Fall einer nicht erfolgreichen Brandbekämpfung die Maximaltemperaturen der Kabelmantelinnenwand mit ca. 31 %iger Wahrscheinlichkeit unterhalb 140 °C liegen.

Verteilung der maximal erreichten Kabeltemperaturen

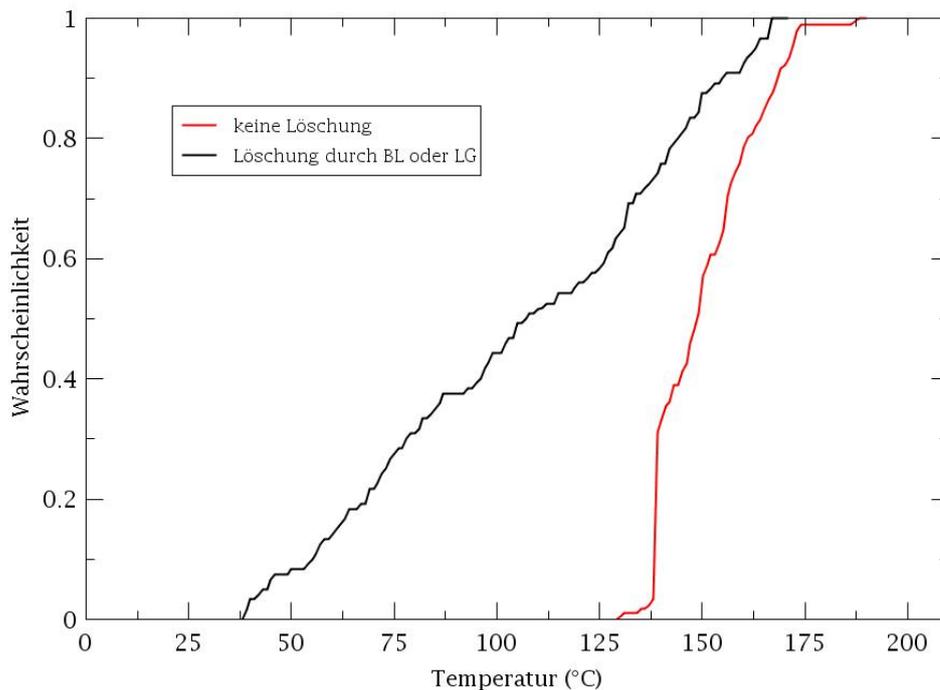


Abb. 4.9 Verteilung der maximal erreichten Kabelmantelinnentemperatur

Ausfallwahrscheinlichkeit elektrischer Kabel im Brandraum

Eine wichtige Aussage einer probabilistischen Brandanalyse ist die Ausfallwahrscheinlichkeit von sicherheitsrelevanten Targets. Als Targets werden hier die elektrischen Kabel betrachtet, die unter der Decke des Brandraums entlangführen (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Im Nachfolgenden soll gezeigt werden, dass durch eine IDPSA unter Verwendung von MCDET Ergebnisse erzeugt werden können, die eine genauere Spezifikation von Ausfallkriterien der Kabel im Brandraum erlauben, und welchen Einfluss die unterschiedlichen Spezifikation der Ausfallkriterien auf die probabilistischen Aussagen und ihre Unsicherheiten haben.

Bei der Spezifikation der Ausfallkriterien eines Kabels kann man von unterschiedlichen Betrachtungen ausgehen:

- Für den Ausfall eines Kabels kann eine Versagenstemperatur zugrunde gelegt werden. Dabei wird angenommen, dass das Kabel versagt, wenn die Temperatur

der Kabelmantelinnenwand die spezifizierte Versagenstemperatur überschreitet. Da man bzgl. der Spezifikation einer Versagenstemperatur unsicher ist, werden für Versagenstemperaturen Kenntnisstandunsicherheiten berücksichtigt.

- Andererseits erscheint es realistisch davon auszugehen, dass nicht nur das Erreichen von Versagenstemperaturen zum Ausfall eines Kabels führen kann. Es können auch Temperaturen, die unterhalb der Versagenstemperatur liegen, zum Versagen führen, wenn die relativ hohen Temperaturen nur lange genug anstehen. Deshalb erscheint es sinnvoll davon auszugehen, dass nicht nur eine bestimmte Versagenstemperatur für den Ausfall eines Kabels wesentlich ist, sondern auch die Zeitdauer, wie lange eine bestimmte Temperatur der Kabelmantelinnenwand überschritten wird. So kann es zum Beispiel zum Ausfall des Kabels kommen, wenn eine Temperatur der Kabelmantelinnenwand von 150 °C um mehr als 1.5 Minuten vorherrscht, es aber nicht zum Ausfall kommt, wenn diese Temperatur nur für 20 s ansteht. Da die Zeit, wie lange Temperaturen bis zum Kabelversagen anstehen müssen, nicht genau bekannt ist, werden für die entsprechenden Zeitdauern Kenntnisstandunsicherheiten berücksichtigt.

Bei den beiden Kriterien, in denen der Ausfall eines Kabels unterschiedlich spezifiziert wird, handelt es sich um einen typischen Fall von Modellunsicherheiten. Im Folgenden wird demonstriert, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Spezifikationen von Ausfallkriterien auf die Ausfallwahrscheinlichkeit des Kabels im Brandraum haben. Dabei ist an dieser Stelle ausdrücklich zu betonen, dass die hier aufgeführten Versagenstemperaturen und Zeitdauern nur zu Demonstrationszwecken verwendet werden und für realistische Anwendung anhand von Daten aus der Betriebserfahrung und Expertenschätzungen überprüft und ggf. angepasst werden müssen.

Für den Ausfall eines Kabels werden zwei verschiedene Ausfallkriterien spezifiziert:

- Bei diesem Kriterium wird ein Ausfall des Kabels angenommen, wenn eine bestimmte kritische Temperatur (Versagenstemperatur) der Innenwand des Kabelmantels überschritten wird. Da die Versagenstemperatur nicht genau bekannt ist, werden Kenntnisstandunsicherheiten (epistemische Unsicherheiten) bzgl. der Versagenstemperatur spezifiziert. Die Unsicherheiten bzgl. der Versagenstemperatur T_{crit} werden durch eine Gleichverteilung zwischen 145 °C und 195 °C mit einem Referenzwert von 170 °C spezifiziert, d. h. $T_{\text{crit}} \sim U(145,195)$. Die Spezifikation erfolgte in Anlehnung an die Versuchsergebnisse der iBMB-Studie /HOS 05/.

- Bei diesem alternativen Ausfallkriterium wird ein Ausfall des Kabels angenommen, wenn ein bestimmter Temperaturbereich länger als eine kritische Zeitdauer ansteht. Dazu werden folgende Abschätzungen angenommen. Es wird ein Ausfall des Kabels angenommen, wenn Temperaturen
 - $\geq 145\text{ °C}$ länger als $\delta_1 = 420\text{ s}$ anstehen, wobei die Unsicherheit der Zeitdauer δ_1 als Gleichverteilung zwischen 360 s und 480 s angenommen wird, d. h. $\delta_1 \sim U(360,480)$,
 - $\geq 150\text{ °C}$ länger als $\delta_2 = 300\text{ s}$ anstehen, wobei $\delta_2 \sim U(240,360)$,
 - $\geq 160\text{ °C}$ länger als $\delta_3 = 215\text{ s}$ anstehen, wobei $\delta_3 \sim U(180,250)$,
 - $\geq 170\text{ °C}$ länger als $\delta_4 = 160\text{ s}$ anstehen, wobei $\delta_4 \sim U(120,200)$,
 - $\geq 180\text{ °C}$ länger als $\delta_5 = 80\text{ s}$ anstehen, wobei $\delta_5 \sim U(40,120)$.

Es sei hier nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Abschätzungen der Zeitdauern rein hypothetisch sind und nur zu Demonstrationszwecken dienen. Für realistische Anwendungen sollten diese Abschätzungen auf Daten aus der Betriebserfahrung oder Expertenschätzungen basieren und dementsprechend überprüft und angepasst werden.

Ergebnisse auf der Basis des Ausfallkriteriums 1

Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bzgl. der Versagenstemperatur hat sich eine Verteilung ergeben, die durch die rote Kurve in Abb. 4.10 dargestellt ist. In Tab. 4.9 sind das 5 %-, 50 %- und 95 %-Quantil sowie das obere (95 %,95 %)-Toleranzlimit der Verteilung aufgeführt. Das (95%,95%)-Toleranzlimit besagt, dass mit 95%-iger Sicherheit das 95%-Quantil den angegebenen Wert des Toleranzlimits nicht überschreiten wird. Aufgrund der sehr hohen Unsicherheiten ist die x-Achse der Abb. 4.10 in logarithmischer Skalierung dargestellt. Die Unsicherheiten der Versagenswahrscheinlichkeit variieren von 0 bis 0,5.

Der Mittelwert der Verteilung beträgt $1,76\text{ E-}02$, wobei der Median der Verteilung den Wert 0 und das 95 %-Quantil den Wert $1,53\text{ E-}02$ aufweist. Dieser relativ hohe Mittelwert, der sogar etwas größer ist als das 95 %-Quantil der Verteilung, ergibt sich durch die extrem hohen Unsicherheiten bzgl. der Kabel-Versagenswahrscheinlichkeit und der extremen Schiefe der Verteilung.

Obwohl in der Unsicherheitsanalyse Versagenswahrscheinlichkeiten von 0 mit einer relativen Häufigkeit von ca. 88 % vorkommen, gibt es auch einige wenige Fälle, bei denen die mittleren Wahrscheinlichkeiten des Kabelversagens ca. 0,5 betragen. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei diesen breiten Verteilungen durchaus vorkommen kann, dass der Mittelwert größer ist, als das 95 %-Quantil einer Verteilung.

Tab. 4.9 Quantile und (95 %,95 %)-Toleranzlimit der Verteilung der mittleren Versagenswahrscheinlichkeit eines Kabel im Brandraum auf der Basis von Kriterium 1

Quantile	Versagenswahrscheinlichkeit
5 %	0
50 %	0
95 %	1,53 E-02
Mittelwert	1,76 E-02
(95 %,95 %)-TL	0,51

Um die Verteilung besser interpretieren zu können, soll das Vorgehen zur Ermittlung der Verteilung der Kabel-Versagenswahrscheinlichkeit kurz erläutert werden. Für jeden epistemischen Parametersatz wurden zwei dynamische Ereignisbäume mit variierenden aleatorischen Größen erzeugt. D. h., für die epistemischen Größen wurde eine Stichprobe von 60 Parametervektoren und für die aleatorischen Größen eine Stichprobe von 120 Parametervektoren in der Analyse verwendet. Für jede der 60 ausgespielten Versagenstemperaturen wurden die Temperaturen aller Sequenzen verglichen, die bzgl. der jeweiligen dazugehörigen zwei dynamischen Ereignisbäume berechnet wurden. Der Stichprobenumfang von 60 zufällig ausgespielten Versagenstemperaturen war die geringste Anzahl, um das Verfahren zu demonstrieren und Aussagen bzgl. des (95 %,95 %)-Toleranzlimit machen zu können.

Die Sequenzen, bei denen die Temperatur T zu irgendeinem Zeitpunkt die ausgespielte Versagenstemperatur T_{crit} übersteigt, wird der Ausfallwahrscheinlichkeit des Kabels die Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Sequenz zugeordnet. Die Ausfallwahrscheinlichkeit bzgl. eines dynamischen Ereignisbaumes setzt sich somit aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten derjenigen Sequenzen zusammen, deren Temperaturen zu irgendeinem Zeitpunkt $T > T_{crit}$ sind. Da jeder ausgespielten Versagenstemperatur zwei dynamische Ereignisbäume (DET) zugeordnet sind, wird der Mittelwert aus den für die

beiden DET berechneten Ausfallwahrscheinlichkeiten gebildet. Der Mittelwert aus den beiden DET liefert den Wert der Ausfallwahrscheinlichkeit bzgl. der ausgespielten Versagenstemperatur.

Der hohe Anteil an Versagenswahrscheinlichkeiten mit dem Wert 0 ergibt sich dadurch, dass die für einen dynamischen Ereignisbaum ausgespielte Versagenstemperatur von keiner der erreichten Maximaltemperaturen der Kabelmantelinnenwand, die für jeden Pfad des dynamischen Ereignisbaumes ermittelt wurde, überschritten wird.

Während der aus der Unsicherheitsanalyse berechnete Mittelwert der Versagenswahrscheinlichkeit $1,76 \cdot 10^{-2}$ beträgt, ist das über die Unsicherheitsanalyse ausgewiesene (95 %,95 %)-Toleranzlimit von 0,51 sehr hoch. Insgesamt sind die Ergebnisse der Versagenswahrscheinlichkeiten, die bzgl. des Versagenkriteriums 1 ermittelt wurden, für Entscheidungshilfen nicht zu verwenden.

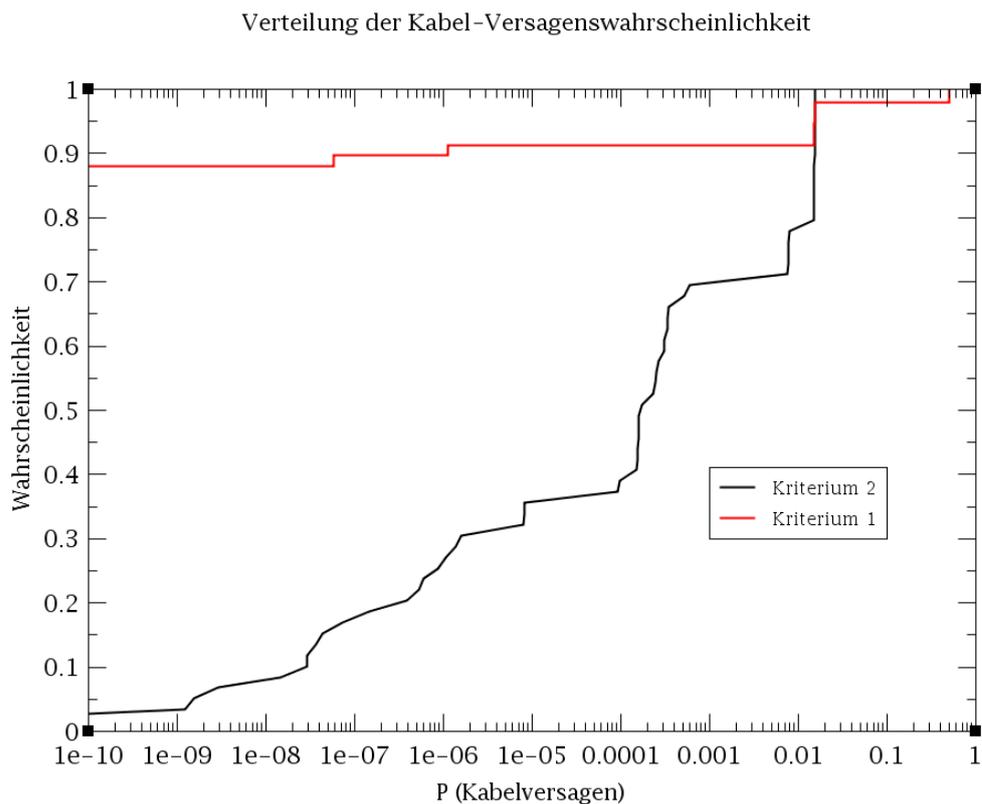


Abb. 4.10 Verteilung der Wahrscheinlichkeit für einen Kabelausfall bzgl. unterschiedlicher Kriterien für ein Kabelversagen

Ergebnisse auf der Basis des Ausfallkriteriums 2

Werden die epistemischen Unsicherheiten bzgl. der Zeitdauern für das Versagenskriterium 2 berücksichtigt, ergibt sich für die Unsicherheiten der Versagenswahrscheinlichkeiten eines Kabels die in Abb. 4.10 dargestellte schwarze Kurve. Quantile und (95 %,95 %)-Toleranzlimit dieser Verteilung sind in Tab. 4.10 aufgeführt. Da die epistemischen Unsicherheiten bzgl. der Versagenswahrscheinlichkeiten lediglich auf einem Stichprobenumfang von 60 Samples beruhen, wird als Schätzung für das 95 %-Quantil der Verteilung das (95 %,95 %)-Toleranzlimit verwendet.

Bei den Ergebnissen, die auf der Basis des Versagenskriteriums 2 berechnet wurden, ist der unplausible hohe Anteil an Ausfallwahrscheinlichkeiten mit dem Wert 0, die man unter Verwendung des Kriteriums 1 erhalten hat, nicht mehr zu erkennen. D. h., durch die feinere Spezifikation bzgl. des Versagens eines Kabels können durch die detaillierten Ergebnisse einer MCDET-Analyse Ereignisse erfasst werden, die mit sehr geringen Wahrscheinlichkeiten auftreten. Wenn das Versagenskriterium jedoch zu grob gewählt wird, können die detaillierten Ergebnisse nicht angemessen bei der Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit berücksichtigt werden.

Tab. 4.10 Quantile und (95 %,95 %)-Toleranzlimit der Verteilung der mittleren Versagenswahrscheinlichkeit eines Kabel im Brandraum auf der Basis des Kriteriums 2

Quantile	Versagenswahrscheinlichkeit
5 %	1,55 E-09
50 %	1,72 E-04
95 %	1,53 E-02
Mittelwert	4,10 E-03
(95 %,95 %)-TL	1,53 E-02

Der Mittelwert der Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Kabels im Brandraum (nach Kriterium 2) beträgt 4,1 E-03. Für das (95 %,95 %)-Toleranzlimit hat sich ein Wert von 1,53 E-02 ergeben. Unter Verwendung des Versagenskriteriums 2 konnte ein signifikant kleinerer Mittelwert und (95 %,95 %)-Toleranzlimit gegenüber des Versagenskriteriums 1 ermittelt werden. Dies liegt daran, dass sich bzgl. Kriterium 1 für einige dynamische Ereignisbäume sehr hohe mittlere Versagenswahrscheinlichkeiten

ergeben haben, da die Maximaltemperaturen fast aller Pfade die für den entsprechenden Baum zufällig ausgespielte Versagenstemperatur überschritten haben.

In Tab. 4.11 werden die mittleren Versagenswahrscheinlichkeiten bzgl. der einzelnen Temperaturbereiche aufgeführt. Daraus ist zu erkennen, dass Temperaturen $\geq 145\text{ °C}$, die länger als 360 – 480 s anstehen, zu ca. 98 % zur mittleren Versagenswahrscheinlichkeit beitragen. Temperaturen $\geq 150\text{ °C}$, die länger als 240 – 360 s anstehen, tragen zu ca. 19 % und Temperaturen $\geq 160\text{ °C}$, die länger als 180 – 350 s anstehen, zu ca. 6 % zur mittleren Versagenswahrscheinlichkeit bei. Temperaturen $\geq 170\text{ °C}$, die länger als 90 – 150 s anstehen bzw. Temperaturen $\geq 180\text{ °C}$, die länger als 40 – 120 s anstehen, treten mit äußerst geringer Wahrscheinlichkeit auf und haben für das Versagen des Kabels kaum Bedeutung.

Die Rechnungen zeigen, dass das Versagen des Kabels insbesondere durch die relativ niedrigen Temperaturen von $145\text{ °C} - 160\text{ °C}$ der Kabelmantelinnenwand verursacht werden, die länger als die ihnen durch die Unsicherheitsanalyse zugeordnete kritische Zeitdauer vorherrschen.

Tab. 4.11 Mittelwert und 95 %-Konfidenzintervall der Versagenswahrscheinlichkeit eines Kabels im Brandraum bzgl. der einzelnen Temperaturintervalle

	Mittelwert	95 %- Konfidenzintervall
Temperaturen $\geq 145\text{ °C}$ stehen länger als $\bar{\delta}_1 \sim U(360,480)$ s an	4,02 E-03	(2,82 E-03 , 5,22 E-03)
Temperaturen $\geq 150\text{ °C}$ stehen länger als $\bar{\delta}_2 \sim U(240, 360)$ s an	7,82E-04	(1,84 E-04, 1,38 E-03)
Temperaturen $\geq 160\text{ °C}$ stehen länger als $\bar{\delta}_3 \sim U(180,250)$ s an	2,50 E-04	(0, 5,99 E-04)
Temperaturen $\geq 170\text{ °C}$ stehen länger als $\bar{\delta}_4 \sim U(90,150)$ s an	1,64 E-07	(0, 4,89 E-07)
Temperaturen $\geq 180\text{ °C}$ stehen länger als $\bar{\delta}_5 \sim U(40,120)$ s an	0	

Diskussion der Ergebnisse bzgl. Kriterium 1 und Kriterium 2

Wenn die bzgl. Versagenskriterium 1 bzw. und Versagenskriterium 2 spezifizierten Kenntnisstandunsicherheiten berücksichtigt werden, ergeben sich signifikante Unter-

schiede in den Verteilungen der Versagenswahrscheinlichkeiten, wie aus Abb. 4.6 deutlich wird.

Bzgl. Kriterium 1 werden mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 88 % Versagenswahrscheinlichkeiten mit dem Wert 0 ausgewiesen während andererseits auch Versagenswahrscheinlichkeiten vorkommen, die einen Wert von ca. 0,5 annehmen. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs von 60 epistemischen Parameterwerten, wird das obere (95 %,95 %)-Toleranzlimit als Schätzung des 95 %-Quantils verwendet. Das obere (95 %,95 %)-Toleranzlimit drückt denjenigen Wert aus, mit dem das 95 %-Quantil mit 95 %-iger Sicherheit nicht überschritten wird.

Das unter der Bedingung von Kriterium 1 ausgewiesene obere (95 %,95 %)-Toleranzlimit beträgt 0,51. Ein dermaßen hoher Wert der Versagenswahrscheinlichkeit ist nicht akzeptabel. Insgesamt lassen nicht nur die sehr großen Unsicherheiten sondern auch der extrem hohe Anteil an Versagenswahrscheinlichkeiten mit dem Wert 0 die Frage aufkommen, ob die Modellierung des Kabelversagens unter Verwendung des Kriteriums 1, in dem das Versagen des Kabels nur über das Kriterium der Versagenstemperatur bestimmt wird, nicht zu grob ist, um das Kabelversagen angemessen zu beschreiben.

Im Vergleich zum Versagenskriterium 1 weisen die Unsicherheiten der Versagenswahrscheinlichkeiten bzgl. des Versagenskriteriums 2 – in dem das Versagen eines Kabels nicht nur allein durch seine Temperatur sondern auch durch die Zeitdauer, wie lange diese Temperatur ansteht – ein plausibleres Verhalten auf. Insbesondere deshalb, da die Modellrechnungen bzgl. des Versagenskriteriums 1 mit einer relativen Häufigkeit von ca. 88 % eine Kabel-Versagenswahrscheinlichkeit mit dem Wert 0 ergeben haben. Daraus könnte gefolgert werden, dass die Versagenstemperatur für die durchgeführte Analyse ein zu grobes Versagenskriterium darstellt. Außerdem scheint das (95 %,95 %)-Toleranzlimit von $1,53 \cdot 10^{-2}$ auf der Basis des Versagenskriteriums 2 eine realistischere obere Abschätzung des 95 %-Quantils der Versagenswahrscheinlichkeit zu sein, als der sehr hohe Wert des (95 %, 95 %)-Toleranzlimits, der sich auf der Basis des Versagenskriteriums 1 ergeben hat.

Der Mittelwert der Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit von $1,76 \cdot 10^{-2}$ bzgl. Kriterium 1 ist um den Faktor 4 größer, als der Mittelwert der Verteilung bzgl. des Kriteriums 2 von $4,1 \cdot 10^{-3}$, der sich auf der Basis des Versagenskriteriums 2 ergibt. Der alleinige Vergleich der Mittelwerte würde bis auf den Größenunterschied keine gravie-

renden Auffälligkeiten bzgl. der beiden Modelle aufweisen. Erst bei Betrachtung der Unsicherheiten der Versagenswahrscheinlichkeiten, die sich auf der Basis der beiden unterschiedlichen Versagenskriterien ergeben haben, erhält man Anzeichen, die Aufschluss über die Qualität der Modellrechnungen liefern können.

Der Vergleich der Ergebnisse aus der Unsicherheitsanalyse bzgl. der beiden Versagenskriterien zeigt deutlich, welchen Effekt die Definition von Versagenskriterien auf die Versagenswahrscheinlichkeit haben kann. Anhand der Ergebnisse aus der Unsicherheitsanalyse (siehe Abb. 4.10) wird deutlich, dass das Versagenskriterium 1 gegenüber Versagenskriterium 2 offensichtlich zu grob ist und deshalb eine ungenauere Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit liefert. Beispielsweise wurden im Rahmen der Unsicherheitsanalyse häufig Versagenstemperaturen ausgespielt die von keiner Sequenz der entsprechenden dynamischen Ereignisbäume erreicht wurde. Daraus ergaben sich Versagenswahrscheinlichkeiten mit dem Wert 0. Wenn die ausgespielten Versagenstemperaturen relativ klein sind, werden sie von einer Vielzahl der Sequenzen überschritten, woraus sich sehr hohe Versagenswahrscheinlichkeiten ergeben.

Die Unsicherheitsanalyse der Kabelversagenswahrscheinlichkeit, die auf dem Versagenskriterium 2 basiert, hat zu aussagekräftigeren und genaueren Ergebnissen geführt, als die Unsicherheitsanalyse, die allein auf der Basis der Versagenstemperatur (Versagenskriterium 1) ermittelt wurden. Obwohl die gleichen MCDET-Ergebnisse für die Auswertung zugrunde gelegt werden, wurde durch die detailliertere Definition des Versagenskriteriums 2 eine signifikante Verbesserung der Verteilung der Kabelversagenswahrscheinlichkeit erzielt.

D. h. durch die detaillierten Ergebnisse einer MCDET-Analyse ist die Möglichkeit gegeben, Versagenskriterien detaillierter zu spezifizieren und diese Informationen in der Auswertung zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck müssen allerdings die entsprechenden Daten, z. B. aus Experimenten oder Betriebserfahrung, zur Verfügung gestellt werden. Die Vorteile einer dynamischen Brand-PSA mit MCDET bestehen darin, dass

- zum einen aus den Ergebnissen einer MCDET-Analyse über post-Processing Analysen Aussagen darüber gemacht werden können, wie lange bestimmte Targets einer bestimmten Temperatur oder einem bestimmten Temperaturbereich ausgesetzt sind und mit welcher Wahrscheinlichkeit dies erfolgt, sowie

- zum anderen Daten dazu, wie lange Targets einem bestimmten Temperaturbereich ausgesetzt sein müssen, damit sie versagen (wenn sie denn zu Verfügung stehen), für eine Schätzung von Versagenswahrscheinlichkeiten verwendet werden können.

Sofern keine Daten aus der Betriebserfahrung oder experimentelle Daten vorliegen, können derartige Analysen, bei denen die Modellparameter über Expertenbeurteilungen abgeschätzt werden, dennoch sinnvoll sein, da sie in Verbindung mit einer Unsicherheitsanalyse einen Eindruck über erzielbare Ergebnisse und Hinweise auf eine gezielte Planung von Experimenten liefern können, aus denen solche Daten gewonnen werden können. Diese Art von Vergleich und Beurteilung von Modellierungstiefen sollte am oben aufgeführten Beispiel der beiden Kriterien bzgl. des Versagens von Kabeln im Brandraum demonstriert werden.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens RS1198 „Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen“ wurde eine integrale deterministisch-probabilistische Sicherheitsanalyse (IDPSA) eines Brandszenarios unter Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmaßnahmen durch das Anlagenpersonal durchgeführt. Die IDPSA wurde unter Verwendung des Analysewerkzeugs MCDET und dem Brandsimulationscode FDS durchgeführt. Die durchgeführte Analyse zeigt beispielhaft die Modellierungs- und Analysemöglichkeiten einer IDPSA mit MCDET im Rahmen einer probabilistischen Brandanalyse.

Um in dieser erstmaligen kombinierten Anwendung von CFD-Brandsimulation und MCDET-Simulationsrechnungen die benötigten Rechenleistungen kontrollierbar zu halten, wurde im Referenzkraftwerk ein relativ schnell verlaufendes Ölbrandszenario in einem relativ kleinen Brandraum betrachtet. Als sicherheitsrelevante Targets wurden Leittechnikabel betrachtet, die durch die Brandbelastung an der Kabelmantelinnenseite erwärmt wurden, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit brandbedingter Funktionsausfälle erhöht. Als Brandszenario wurde das Versagen eines elektrischen Ölvorwärmers angenommen. Der Luftbedarf des Raumbrands einschließlich der dynamischen Aspekte des Raumabschlusses wie Schließen von Brandschutzklappe und Öffnen und Schließen der Brandschutztür in den Flurbereich wurden realitätsnah modelliert.

Durch die Kombination von MCDET mit dem FDS-Code konnten Wechselwirkungen zwischen Brandentwicklung und stochastischen Einflüsse bzgl. der Zuverlässigkeit von Brandschutzeinrichtungen (z. B. Brandschutzklappe schließt nicht auslegungsgemäß oder Tür des Brandraums bleibt fehlerhaft offen) im zeitlichen Ablauf berücksichtigt werden. Das Crew-Modul – als Bestandteil des Analysewerkzeugs MCDET (siehe /KLO 13/ und /KLO 13a/) – wurde für die Simulation und Analyse der Handlungsabläufe des Anlagenpersonals zur Brandbekämpfung eingesetzt.

Das Modell der Brandrandbekämpfung basiert auf der Brandschutzverordnung der zugrunde gelegten Referenzanlage. Das Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bestand insbesondere darin, die Brandbekämpfung als dynamischen Prozess zu modellieren und zu simulieren. Für die Brandbekämpfung wurden verschiedene stochastische Einflussgrößen (aleatorische Unsicherheiten) berücksichtigt, die Einfluss auf den Handlungsablauf haben.

Die einzelnen Handlungen der im Modell berücksichtigten Personen und die jeweils zu den Handlungen benötigten Ausführungszeiten wurden im Detail für die Situationen beschrieben, dass die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert bzw. defekt ist. Die Flexibilität des Crew-Moduls erlaubt sowohl eine integrale Simulation von menschlichen Handlungen und Prozessdynamik, als auch eine Simulation der Handlungsabläufe abgekoppelt von der Berechnung des physikalischen Prozesses durch den deterministischen Rechencode. Durch eine geeignete Spezifikation der Handlungslisten ist es möglich, Handlungsabläufe unter verschiedenen Bedingungen, die sich durch die Branddynamik ergeben können und die Einfluss auf die Handlungsabläufe haben, durch das Crew-Modul zu simulieren und die entsprechenden bedingten Zeitverteilungen zu ermitteln. Die über das Crew-Modul ermittelten bedingten Verteilungen, z. B. wann Brandläufer oder Löschgruppe den Brandraum erreichen oder wann diese jeweils mit der Löschung des Brandes in Abhängigkeit davon beginnen, ob Rauchaustritt unter der Brandraumtür sichtbar ist oder nicht, können dann als aleatorische Größen in die MCDET-Analyse mit der Branddynamik eingebunden werden. Aus den jeweiligen bedingten Verteilungen bzgl. der Handlungen werden im Rahmen der MCDET/FDS-Analyse genau dann die benötigten Zufallswerte ausgespielt, wenn die jeweils zugehörige Bedingung bzgl. der Brandentwicklung erfüllt ist.

Diese Vorgehensweise wurde in der durchgeführten Analyse erfolgreich angewendet. Durch die Anwendung dieser Methode kann der Rechenaufwand erheblich reduziert werden, da die abgekoppelten Analysen mit dem Crew-Modul, relativ wenig Rechenzeit beanspruchen.

Neben den aleatorischen Unsicherheiten, die die menschlichen Handlungen der Brandbekämpfung betreffen, wurden in der IDPSA auch aleatorische Unsicherheiten bzgl. aktiver Brandschutzeinrichtungen berücksichtigt, z. B. Brandmeldeanlage und Brandschutzklappe. Zusätzlich wurden auch potentiell relevante epistemische Unsicherheiten berücksichtigt. Diese betreffen insbesondere verschiedene Modellparameter des FDS-Codes und Größen, die zur Spezifikation des Ausfallverhaltens von Targets verwendet werden, wie z. B. Versagenstemperatur von Kabeln der Elektro- und Leittechnik.

Aus der großen Datenmenge, die mittels der FDS/MCDET-Analyse erzeugt wurde, wurden über Post-Processing-Analysen Verteilungen und bedingte Verteilungen berechnet, aus denen probabilistische Aussagen zu Demonstrationszwecken abgeleitet wurden, u. a. bzgl. der Frage, welchen Einfluss die Zuverlässigkeit der Brandschutz-

klappe auf die maximal erreichten Raumtemperaturen bzw. der Temperaturen der Kabelisolierung haben bzw. auf die Expositionszeit haben, wie lange kritische Raumtemperaturen bzw. kritische Temperaturen des Kabelmantels anstehen.

Durch die in diesem Vorhaben durchgeführte IDPSA einer Brandanalyse (siehe auch KLO 14a/) konnte gezeigt werden, dass eine probabilistische Dynamikanalyse mit MCDET

- die Berücksichtigung nicht nur epistemischer Unsicherheiten erlaubt, was bisher Stand von Wissenschaft und Technik ist, sondern auch umfassend aleatorische Unsicherheiten (stochastische Einflussgrößen) in die Analyse einbeziehen und deren Einfluss auf die Ergebnisse quantifizieren,
- über das Crew-Modul als Bestandteil von MCDET menschliche Handlungen als dynamischen Prozess simulieren und analysieren,
- Wechselwirkungen zwischen menschlichen Handlungen und dem Prozess der Brandentwicklung sowie Dynamik-Stochastik Wechselwirkungen berücksichtigen kann sowie
- detaillierte Wahrscheinlichkeitsaussagen relevanter Ereignisse abgeleitet werden können.

Es lassen sich auch Wahrscheinlichkeitsaussagen ableiten, die sich unter der Bedingung bestimmter Ereignisse ergeben, z. B. Verteilung der Zeit, wann der Brand erfolgreich gelöscht wird unter der Bedingung, dass der Brandläufer die Feuerlöschanlage nicht manuell auslösen kann und die Löschung durch die Feuerwehr erfolgt.

Das Brandszenario wurde bis 1800 s (0,5 Stunden) nach Brandentstehung berechnet. Dies erschien ausreichend, da es sich bei dem ausgewählten Brand um ein relativ schnell verlaufendes Ölbrandszenario in einem relativ kleinen Brandraum handelt. Neben dem Rechenzeitende von 1800 s nach Brandentstehung wurde der Löscherfolg als ein weiteres Abbruchkriterium definiert. Für den Erfolg der Löschung wird in der Analyse das Kriterium verwendet, dass eine Löschung des Brandes innerhalb 1800 s nach Brandentstehung stattfindet und die Temperatur an der Innenwand der Kabelummantelung 120 °C unterschreitet.

Die Brandsimulationen wurden mit dem Brandsimulationscode 'Fire Dynamics Simulator' (FDS) in Verbindung mit dem MCDET-Analysewerkzeug durchgeführt. Im Rahmen

der FDS/MCDET-Analyse wurden 120 dynamische Ereignisbäume erzeugt, wobei ca. 2400 unterschiedliche Sequenzen berechnet wurden. Die unterschiedlichen Sequenzen ergeben sich aus den aleatorischen Unsicherheiten bzgl.

- aktiver Brandschutzeinrichtungen (Brandmeldeanlage funktioniert/defekt, Brandschutzklappe und Brandraumtüren schließen auslegungsgemäß ja/nein) und
- der menschlichen Handlungsabläufe zur Brandbekämpfung (z. B. Zeitverteilung wann es dem Brandläufer gelingt, die stationäre Löschanlage manuell auszulösen)

Für die parallele Ausführung der FDS/MCDET-Simulationsrechnungen wurden insgesamt 40 Rechenknoten eingesetzt, von denen 32 Rechenknoten von einem MS Windows HPC (High Performance Computing) Cluster mit insgesamt 32 Rechenknoten zur Verfügung gestellt wurden. Die Simulationsrechnungen konnten in einem Zeitraum von etwa eineinhalb Wochen durchgeführt werden.

Die umfangreichen Ergebnisse der FDS/MCDET-Analyse können im Rahmen von Post-Processing Analysen bzgl. verschiedener Fragestellungen ausgewertet werden. So wurde z. B. der Einfluss des stochastischen Verhaltens der Brandschutzklappe auf den Verlauf der Raumtemperatur bzw. der Temperatur an der Innenwand des Kabelmantels untersucht. Dabei wurden die epistemischen Unsicherheiten bzgl. der Parameter des FDS-Codes berücksichtigt.

Es wurden bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zeit ermittelt, wie lange Raumtemperaturen $> 200\text{ °C}$ bzw. Temperaturen der Innenseite der Kabelummantelung von $> 150\text{ °C}$ anstehen. Die Zeitverteilungen wurden unter den Bedingungen ermittelt, dass die Brandschutzklappe bei Anforderung auslegungsgemäß schließt bzw. fehlerhaft offen bleibt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Zeitdauer, in der Temperaturen $> 200\text{ °C}$ im Raum vorherrschen, signifikant höher ist, wenn die Brandschutzklappe fehlerhaft geöffnet bleibt. Auch die Temperaturen der Kabelmantelinnenseite weisen längere Zeitintervalle mit Temperaturen $> 150\text{ °C}$ auf, wenn die Brandschutzklappe nicht schließt.

In der Analyse des Brandszenarios wurde von dem Kriterium ausgegangen, dass die Brandbekämpfung innerhalb einer halben Stunde nach Entstehung des Brandes durchgeführt werden soll. Zusätzlich wurde für die Brandanalyse angenommen, dass die im Brandraum installierte stationäre Feuerlöschanlage nicht automatisch ausgelöst

wird, jedoch an der Ventilstation der Feuerlöschanlage vor Ort durch Öffnen des entsprechenden Ventils manuell ausgelöst werden kann.

Unter diesen Bedingungen wurden Wahrscheinlichkeiten verschiedener Situationen ermittelt, in denen eine erfolgreiche Löschung des Brandes nicht innerhalb 1800 s nach Brandentstehung durchgeführt werden konnte. Im Fall einer intakten Brandmeldeanlage ist diese Wahrscheinlichkeit sehr gering und ergibt sich durch die Ereignisse, dass der Brandläufer die Feuerlöschanlage nicht manuell aktivieren konnte und zusätzlich Recovery-Aktionen der Löschgruppe notwendig sind, wenn die Löschausrüstung defekt ist oder andere unvorhergesehene Ereignisse eintreten, die längere Recovery-Aktionen zur Folge haben.

Im Fall einer defekten Brandmeldeanlage wird davon ausgegangen, dass der Brand nur durch einen Rundgänger entdeckt werden kann, der zufällig am Brandraum ankommt und den Brand bemerkt. Die Möglichkeit, dass der Brand von anderen Personen, die zufällig den Brandraum betreten, entdeckt werden kann, kann grundsätzlich berücksichtigt werden, wurde aber in dieser Analyse nicht in Betracht gezogen.

Die Simulationsrechnungen mit dem Crew-Modul haben ergeben, dass der Rundgänger nicht später als 28 Minuten nach Brandentstehung den Brandraum erreicht darf und den Brand erkannt haben muss, damit überhaupt die Möglichkeit gegeben ist, eine erfolgreiche Brandbekämpfung innerhalb einer halben Stunde nach Brandentstehung durchführen zu können. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Rundgänger während seiner achtstündigen Schicht zufällig innerhalb von 28 Minuten nach Brandentstehung am Brandraum ankommt und den Brand erkennt, ist jedoch relativ gering. Im Fall einer defekten Brandmeldeanlage und dem Ausfall der automatischen Auslösung der Brandmeldeanlage trägt das Ereignis, dass der Rundgänger den Brandraum nicht rechtzeitig erreicht, zu mehr als 99 % dazu bei, dass der Brand nicht innerhalb einer halben Stunde nach Brandentstehung erfolgreich bekämpft werden kann.

Für die verschiedenen Brandbekämpfungsmaßnahmen (z. B. Brandläufer löst manuell die Feuerlöschanlage aus, Löschgruppe beginnt die Löschung mit ihrer Löschausrüstung) wurden Wahrscheinlichkeiten ihrer erfolgreichen Ausführung und Zeitverteilungen angegeben, wann die jeweilige Brandbekämpfung durchgeführt wird. Des Weiteren wurde der Einfluss der jeweiligen Brandbekämpfung auf die Entwicklung der Raumtemperatur und der Temperatur der Innenwand der Kabelummantelung quantifiziert.

Der Brandläufer beginnt mit einer Wahrscheinlichkeit von 71 % innerhalb von 10 Minuten nach dem Brandalarm mit der Löschung des Brandes. Wenn der Brandläufer keine erfolgreiche Brandbekämpfung durchführen kann (z. B. da er die Feuerlöschanlage nicht manuell auslösen kann), kann die Brandbekämpfung immer noch durch die Löschruppe erfolgen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit die Löschung zwischen 13 und 22 Minuten nach der Brandalarmierung beginnen kann. Durch den früheren Löschruppenbeginn des Brandläufers können sowohl die maximal erreichten Raum- und Kabelmantelinnentemperaturen als auch die Zeit, wie lange hohe Temperaturen anstehen, stärker reduziert werden als durch den Einsatz der Löschruppe. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Löschruppe nur dann die Brandbekämpfung beginnt, wenn der Brandläufer mit seiner Brandbekämpfung keinen Erfolg hat. In diesen Fällen hat sich gezeigt, dass die Brandbekämpfung durch die Löschruppe zwar keinen großen Effekt auf die Maximal erreichten Temperaturen hat (da die Maximaltemperaturen relativ früh erreicht werden) aber doch einen relevanten Einfluss auf die Verringerung der Zeit, wie lange hohe Temperaturwerte anstehen.

Eine wichtige Aussage einer probabilistischen Brandanalyse ist die Ausfallwahrscheinlichkeit sicherheitsrelevanter Targets. Als Targets wurden hier sicherheitsrelevante Kabel der Elektro- und Leittechnik betrachtet, die unter der Decke des Brandraums entlangführen. In der durchgeführten Analyse wurde gezeigt, dass durch eine probabilistische Dynamikanalyse eines Brandszenarios unter Verwendung des Analysewerkzeugs MCDET Ergebnisse erzeugt werden können, die auf der Basis einer detaillierten Spezifikation von Versagenskriterien von Targets ausgewertet werden können.

Bei der Spezifikation der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Kabels wurde von folgenden unterschiedlichen Versagenskriterien ausgegangen:

- Als Kriterium für den Ausfall eines Kabels wurde eine Versagenstemperatur zugrunde gelegt (Versagenskriterium 1). Dabei wird angenommen, dass das Kabel versagt, wenn die Temperatur der Kabelmantelinnenwand die Versagenstemperatur überschreitet. Die Kenntnisstandunsicherheit (epistemische Unsicherheiten) der Versagenstemperatur wurde durch eine Gleichverteilung zwischen 145 °C und 195 °C der Kabelmantelinnenwand berücksichtigt.
- Andererseits erscheint es realistisch davon auszugehen, dass auch Temperaturen, die unterhalb der Versagenstemperatur liegen, zum Versagen führen können, wenn die relativ hohen Temperaturen nur lange genug anstehen. Als ein alternatives Versagenskriterium (Versagenskriterium 2) wurde deshalb ein Ausfall des Ka-

bels angenommen, wenn ein bestimmter Temperaturbereich länger als eine kritische Zeitdauer ansteht. Da die Zeit, wie lange Temperaturen bis zum Kabelversagen anstehen müssen, nicht genau bekannt ist, wurden für die kritischen Zeitdauern der entsprechenden Temperaturbereiche Kenntnisstandunsicherheiten berücksichtigt. Dazu wurde folgende Spezifikation des Versagenskriteriums zugrunde gelegt. Es wird ein Ausfall des Kabels angenommen, wenn Temperaturen

- $\geq 145\text{ °C}$ länger als $\bar{\delta}_1 = 420\text{ s}$ anstehen, wobei die Unsicherheit der Zeitdauer $\bar{\delta}_1$ als Gleichverteilung zwischen 360 s und 480 s angenommen wird, d. h. $\bar{\delta}_1 \sim U(360,480)$,
- $\geq 150\text{ °C}$ länger als $\bar{\delta}_2 = 300\text{ s}$ anstehen, wobei $\bar{\delta}_2 \sim U(240,360)$,
- $\geq 160\text{ °C}$ länger als $\bar{\delta}_3 = 215\text{ s}$ anstehen, wobei $\bar{\delta}_3 \sim U(180,250)$,
- $\geq 170\text{ °C}$ länger als $\bar{\delta}_4 = 160\text{ s}$ anstehen, wobei $\bar{\delta}_4 \sim U(120,200)$,
- $\geq 180\text{ °C}$ länger als $\bar{\delta}_5 = 80\text{ s}$ anstehen, wobei $\bar{\delta}_5 \sim U(40,120)$.

(Anmerkung: Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Abschätzungen der Zeitdauern zu den Temperaturbereichen rein hypothetisch sind und in dieser Untersuchung nur zu Demonstrationszwecken dienen.)

Die Unsicherheitsanalyse der Kabelversagenswahrscheinlichkeit, die auf dem Versagenskriterium 2 basiert, hat zu aussagekräftigeren und genaueren Ergebnissen geführt, als die Unsicherheitsanalyse, die allein auf der Basis der Versagenstemperatur (Versagenskriterium 1) ermittelt wurde. Obwohl die gleichen MCDET-Ergebnisse für die Auswertung zugrunde gelegt werden, wurde durch die detailliertere Definition des Versagenskriteriums 2 eine signifikante Verbesserung der geschätzten Verteilung der Kabel-Versagenswahrscheinlichkeit erzielt.

Durch die detaillierten Ergebnisse einer MCDET-Analyse ist die Möglichkeit gegeben, Versagenskriterien detaillierter zu spezifizieren und diese Informationen in der Auswertung zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck müssen allerdings die entsprechenden Daten, z. B. aus Experimenten oder Betriebserfahrung, zur Verfügung gestellt werden. Sofern keine Daten aus der Betriebserfahrung oder experimentelle Daten vorliegen, können derartige Analysen, bei denen die Modellparameter über Expertenbeurteilungen abgeschätzt werden, dennoch sinnvoll sein, da sie in Verbindung mit einer Unsicherheitsanalyse einen Eindruck über erzielbare Ergebnisse und Hinweise auf eine

gezielte Planung von Experimenten liefern können, aus denen solche Daten gewonnen werden können.

Die Ergebnisse der Untersuchungen, die zum Teil bereits in /KLO 13a/ und /KLO 14a/ veröffentlicht wurden, zeigen sowohl die Notwendigkeit als auch den Vorteil, zeitabhängige Informationen in die Zuverlässigkeitsbewertung von Komponenten einzubeziehen, um realistischere Abschätzungen von Versagenswahrscheinlichkeiten von Targets im Rahmen einer probabilistischen Brandanalyse durchführen zu können. Diese zeitabhängigen Informationen können über das Analysewerkzeug MCDET in Verbindung mit einem deterministischen Reencode im Rahmen einer integralen deterministisch-probabilistischen Sicherheitsanalyse (IDPSA) ermittelt und für probabilistische Auswertungen verwendet werden.

Literaturverzeichnis

- /FOR 14/ Forell, B., S. Einarsson: Ergänzung und Aktualisierung von Zuverlässigkeitskenngrößen für Brandschutzeinrichtungen in deutschen Leichtwasserreaktoren, GRS-A-3719, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2014.
- /HOF 01/ Hofer, E., et al.: Methodenentwicklung zur simulativen Behandlung der Stochastik in probabilistischen Sicherheitsanalysen der Stufe 2, GRS-A-2997, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching, Dezember 2001.
- /HOS 05/ Hosser, D., O. Riese, M. Klingenberg: Durchführung von weiterführenden Kabelbrandversuchen einschließlich der Präsentation der Ergebnisse im Rahmen des internationalen Projektes ICFMP, Vorhaben SR 2449, Unterauftrag UA-2298, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-2005-663, 2005.
- /HOS 14/ Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 3. überarbeitete und ergänzte Auflage November 2013, redaktionell überarbeitet Januar 2014, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (VFDB), Braunschweig/Altenberge, 2014, www.vfdb.de.
- /KLO 06/ Kloos, M., J. Peschke: MCDET – A Probabilistic Dynamics Method Combining Monte Carlo Simulation with the Discrete Dynamic Event Tree Approach. Nuclear Science and Engineering (153), 2006, S. 137-156.
- /KLO 13/ Kloos, M., et al.: Updates and Current Application of the MCDET Simulation Tool for Dynamic PSA, in: Proceedings of ANS PSA 2013 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Columbia, SC, September 22-26, 2013, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, 2013.

- /KLO 13a/ Kloos, M., et al.: Advanced Probabilistic Dynamics Analysis of Fire Fighting Actions in A Nuclear Power Plant with the MCDET Tool, in: Proceedings of Annual European Safety and Reliability Conference 2013 (ESREL 2013), Amsterdam, The Netherlands, September 29 – October 2, 2013, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 2013.
- /KLO 14/ Kloos, M., J. Peschke, J., Scheuer: Weiterentwicklung der MCDET-Methode und des zugehörigen Rechenwerkzeugs für probabilistische Dynamikanalysen, GRS-330, ISBN 978-3-944161-10-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching, Juni 2014.
- /KLO 14a/ Kloos, M., J. Peschke, B. Forell: Insights from an Integrated Deterministic Probabilistic Safety Analysis (IDPSA) of a Fire Scenario, in: Proceedings of 12th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM12), Honolulu, HI, USA, Juni 2014.
- /MCG 13/ McGrattan, K. et al. : Fire Dynamics Simulator, User's Guide, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, November 2013.
- /PES 06/ Peschke, J., et al.: Methodenentwicklung für die Berücksichtigung menschlicher Eingriffe im Rahmen einer dynamischen PSA der Stufen 1 und 2, GRS-A-3340, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching, 2006.
- /PES 10/ Peschke, J., B. Krzykacz-Hausmann: Methodenentwicklung zur Durchführung von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen im Rahmen einer probabilistischen Dynamikanalyse, GRS-A-3556, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching, 2010.
- /PUR 05/ Purser, D.: Toxicity assessment of combustion products and human behaviour in fires, in: Tagungsband zum 10. Internationalen Brandschutzsymposium "Ingenieurmethoden des Brandschutzes", 6. und 7. Juni 2005 in Hannover. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. / iBMB, Braunschweig, 2005.

/SWA 83/ Swain, A. D., H. E. Guttman: Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC, 1983.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist.....	30
Abb. 2.2	Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist (Fortsetzung 1).....	31
Abb. 2.3	Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist (Fortsetzung 2).....	32
Abb. 2.4	Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist (Fortsetzung 3).....	33
Abb. 2.5	Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage verfügbar ist (Fortsetzung 4).....	33
Abb. 2.6	Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage defekt ist.....	64
Abb. 2.7	Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage defekt ist (Fortsetzung 1).	65
Abb. 2.8	Handlungsablauf unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage defekt ist (Fortsetzung 2).	65
Abb. 3.1	Ausschnitt aus dem Brandschutzplan der Referenzanlage mit dem Ölversorgungsraum	83
Abb. 3.2	Bildschirmkopie der Brandsimulation mit FDS mit Verdeutlichung des Feuers	88
Abb. 4.1	Skizze zur Berücksichtigung der Wechselwirkung von Prozesszuständen und aleatorischen Unsicherheiten.....	102
Abb. 4.2	Verläufe der Raumtemperaturen unter den Bedingungen, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw., dass die Brandschutzklappe fehlerhaft offen bleibt	108
Abb. 4.3	Verläufe der Temperaturen der Kabelmantelinnenwand unter der Bedingung, dass Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw., dass die Brandschutzklappe fehlerhaft offen bleibt	108

Abb. 4.4	Bedingte Verteilungen der Zeitdauern, wie lange Raumtemperaturen > 200 °C unter den Bedingungen anstehen, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw. fehlerhaft offen bleibt und keine Brandbekämpfung stattfindet	111
Abb. 4.5	Bedingte Verteilungen der Zeitdauern, wie lange Kabeltemperaturen > 150 °C unter den Bedingungen anstehen, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw. fehlerhaft offen bleibt und keine Brandbekämpfung stattfindet	112
Abb. 4.6	Bedingte Verteilungen der maximalen Raumtemperaturen unter verschiedenen Bedingungen der Brandbekämpfung.....	119
Abb. 4.7	Temperaturverlauf der Kabelmantelinnenwand in Abhängigkeit verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen und epistemischen Unsicherheiten.....	122
Abb. 4.8	Verteilung der Zeit von Brandentstehung bis zur Löschung des Brandes	124
Abb. 4.9	Verteilung der maximal erreichten Kabelmantelinnentemperatur	127
Abb. 4.10	Verteilung der Wahrscheinlichkeit für einen Kabelausfall bzgl. unterschiedlicher Kriterien für ein Kabelversagen	131

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Zusammenfassung der berücksichtigten zufallsbedingten alternativen Situationen (aleatorische Unsicherheit) und die für deren Wahrscheinlichkeitsbewertung geschätzten epistemischen Unsicherheiten.....	18
Tab. 2.2	Löschzeiten der Löschgruppe (LG) in Abhängigkeit von der optischen Dichte im Brandraum	24
Tab. 2.3	Löschzeiten des Brandläufers (BL) in Abhängigkeit von der optischen Dichte im Brandraum	24
Tab. 2.4	Beschreibung der Basishandlungen der HL 101	34
Tab. 2.5	Beschreibung der Basishandlungen der HL 103	37
Tab. 2.6	Beschreibung der Basishandlungen der HL 104	38
Tab. 2.7	Beschreibung der Basishandlungen der HL 105	39
Tab. 2.8	Beschreibung der Basishandlungen der HL 106	40
Tab. 2.9	Beschreibung der Basishandlungen der HL 107	41
Tab. 2.10	Beschreibung der Basishandlungen der HL 108	41
Tab. 2.11	Beschreibung der Basishandlungen der HL 117	42
Tab. 2.12	Beschreibung der Basishandlungen der HL 109	43
Tab. 2.13	Beschreibung der Basishandlungen der HL 110	43
Tab. 2.14	Beschreibung der Basishandlungen der HL 111	45
Tab. 2.15	Beschreibung der Basishandlungen der HL 112	45
Tab. 2.16	Beschreibung der Basishandlungen der HL 113	46
Tab. 2.17	Beschreibung der Basishandlungen der HL 118	47

Tab. 2.18	Beschreibung der Basishandlungen der HL 119	48
Tab. 2.19	Beschreibung der Basishandlungen der HL 120	49
Tab. 2.20	Beschreibung der Basishandlungen der HL 121	50
Tab. 2.21	Beschreibung der Basishandlungen der HL 15	51
Tab. 2.22	Beschreibung der Basishandlungen der HL 125	51
Tab. 2.23	Beschreibung der Basishandlungen der HL 135	52
Tab. 2.24	Beschreibung der Basishandlungen der HL 136	53
Tab. 2.25	Beschreibung der Basishandlungen der HL 137	54
Tab. 2.26	Beschreibung der Basishandlungen der HL 115	54
Tab. 2.27	Beschreibung der Basishandlungen der HL 124	55
Tab. 2.28	Beschreibung der Basishandlungen der HL 123	56
Tab. 2.29	Beschreibung der Basishandlungen der HL 116	57
Tab. 2.30	Beschreibung der Basishandlungen der HL 130	58
Tab. 2.31	Beschreibung der Basishandlungen der HL 131	58
Tab. 2.32	Beschreibung der Basishandlungen der HL 132	59
Tab. 2.33	Beschreibung der Basishandlungen der HL 126	60
Tab. 2.34	Beschreibung der Basishandlungen der HL 127	61
Tab. 2.35	Beschreibung der Basishandlungen der HL 128	62
Tab. 2.36	Beschreibung der Basishandlungen der HL 170	66
Tab. 2.37	Beschreibung der Basishandlungen der HL 46	67
Tab. 2.38	Beschreibung der Basishandlungen der HL 47	68

Tab. 2.39	Beschreibung der Basishandlungen der HL 45	69
Tab. 2.40	Beschreibung der Basishandlungen der HL 49	69
Tab. 2.41	Beschreibung der Basishandlungen der HL 48	70
Tab. 2.42	Beschreibung der Basishandlungen der HL 43	71
Tab. 2.43	Beschreibung der Basishandlungen der HL 50	72
Tab. 2.44	Beschreibung der Basishandlungen der HL 51	74
Tab. 2.45	Beschreibung der Basishandlungen der HL 52	75
Tab. 2.46	Beschreibung der Basishandlungen der HL 53	76
Tab. 2.47	Beschreibung der Basishandlungen der HL 54	76
Tab. 2.48	Beschreibung der Basishandlungen der HL 61	77
Tab. 2.49	Beschreibung der Basishandlungen der HL 55	78
Tab. 2.50	Beschreibung der Basishandlungen der HL 56	79
Tab. 2.51	Beschreibung der Basishandlungen der HL 57	80
Tab. 3.1	Aleatorische Unsicherheiten, die im Modell zur Branddynamik berücksichtigt werden	90
Tab. 3.2	Epistemische Unsicherheiten bzgl. des Modells zur Branddynamik	92
Tab. 4.1	Zeitverteilungen, wann BL versucht, die FLA manuell auszulösen, unter unterschiedlichen Bedingungen bzgl. der Brandentwicklung.....	99
Tab. 4.2	Zeitverteilungen wann LG versucht, den Brand mit ihrer Löschsaurüstung zu löschen, unter unterschiedlichen Bedingungen der Brandentwicklung	99
Tab. 4.3	Zeitverteilungen, wann RG versucht, die FLA manuell auszulösen, unter unterschiedlichen Bedingungen der Brandentwicklung und unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage nicht auslegungsgemäß funktioniert	100

Tab. 4.4	Zeitverteilungen wann LG versucht, den Brand mit ihrer Lösch-ausrüstung zu löschen, unter unterschiedlichen Bedingungen der Brandentwicklung und unter der Bedingung, dass die Brandmeldeanlage nicht auslegungsgemäß funktioniert.....	100
Tab. 4.5	Quantile der maximal erreichten Raum- und Kabeltemperaturen unter den Bedingungen, dass Brandschutzklappe und Brandraumtür auslegungsgemäß schließen bzw. die Brandschutzklappe fehlerhaft offen bleibt.....	109
Tab. 4.6	Quantile der Zeitdauer, wie lange Raumtemperaturen > 200 °C bzw. Temperaturen der Kabelmantelinnenwand > 150 °C unter der Bedingung anstehen, dass die Brandschutzklappe auslegungsgemäß schließt bzw. fehlerhaft offen bleibt.....	110
Tab. 4.7	Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Situationen, in denen die Löschung des Brandes nicht innerhalb von 1800 s nach Brandentstehung durch das Anlagenpersonal beginnt.....	114
Tab. 4.8	Quantile der bedingten Verteilungen der maximal erreichten Raumtemperaturen unter der Bedingung verschiedener Brandbekämpfungsmaßnahmen	120
Tab. 4.9	Quantile und (95 %,95 %)-Toleranzlimit der Verteilung der mittleren Versagenswahrscheinlichkeit eines Kabel im Brandraum auf der Basis von Kriterium 1	130
Tab. 4.10	Quantile und (95 %,95 %)-Toleranzlimit der Verteilung der mittleren Versagenswahrscheinlichkeit eines Kabel im Brandraum auf der Basis des Kriteriums 2.....	132
Tab. 4.11	Mittelwert und 95 %-Konfidenzintervall der Versagenswahrscheinlichkeit eines Kabels im Brandraum bzgl. der einzelnen Temperaturintervalle.....	133

Abkürzungen

BHB	Betriebshandbuch
BL	Brandläufer
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CFD	Computational Fluid Dynamics
DET	Dynamic Event Tree
ELFW	Einsatzleiter der Feuerwehr
FDS	Fire Dynamics Simulator
FLA	Feuerlöschanlage
HFL	Handfeuerlöscher
IDPSA	Integrated Deterministic Probabilistic Safety Analysis
LG	Löschgruppe
MCDET	Monte Carlo Dynamic Event Tree
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
RG	Rundgänger
SL	Schichtleiter
SSC	structures, systems and components
SWR	Siedewasserreaktor

A Anhang: Beschreibung der Handlungsabläufe für den Fall, dass nur ein Brandmelder einen Alarm auslöst

Der Vollständigkeit halber werden hier die Handlungsabläufe für den Fall aufgeführt, dass nur EIN Brandmelder Alarm auslöst. Dieser hypothetische Fall, der nach Expertenmeinung nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eintritt (5,0 E-05), wurde nicht in Verbindung mit den Brandsimulationsrechnungen wegen seiner geringen Eintrittswahrscheinlichkeit und aus Gründen der Rechenzeiterparnis berücksichtigt.

Die Modellierung der menschlichen Handlungsabläufe wurde für diesen Fall hauptsächlich deshalb vorgenommen, um die Möglichkeiten der Modellierung menschlicher Handlungen durch das Crew-Modul zu demonstrieren. Aus Gründen des Aufwands für die Beschreibung und der zeitlichen Begrenzung des Projekts werden zu Demonstrationszwecken nur die ersten Handlungsstränge des Ablaufs beschrieben, die sich aufgrund stochastischer Ereignisse, zeitlichen Faktoren und dem Zustand der Brandentwicklung ergeben.

Im Zusammenhang mit der Beschreibung der Handlungsabläufe werden auch die neuen Konzepte der Zeitzähler und der Zeitvergleiche erläutert, die in diesem Projekt im Crew-Modul implementiert wurden. Mit den Zeitzählern können Zeitdauern definiert werden, wie lange eine Person wartet wird, bevor er eine bestimmte Aktion durchführt. Diese Situation kommt im Handlungsablauf der Brandbekämpfung vor, wenn nur ein Brandmelder Alarm auslöst.

Zeitvergleiche werden zwischen beteiligten Personen durchgeführt und können dann eingesetzt werden, wenn der weitere Handlungsablauf davon abhängt, welche Person eine bestimmte Aufgabe eher ausgeführt hat. Zeitvergleiche könne aber auch definiert werden, um die aktuelle Zeit mit den gegebenen Zeiten der Zeitzähler zu vergleichen. Dies soll in der folgenden Beschreibung der Handlungsabläufe genauer ausgeführt werden.

Der Handlungsablauf für die gegebene Meldesituation wird in Form von Handlungslisten beschrieben, wie sie im Crew-Modul spezifiziert wurden. Zu jeder Basishandlung, aus denen die jeweiligen Handlungslisten zusammengesetzt sind, werden in der folgenden Beschreibung die Kurzbezeichnung der Basishandlung und die Zeit angegeben, die für die Ausführung der Basishandlung benötigt wird. Die Nummern der Handlungslisten dienen ausschließlich der Identifikation der Handlungslisten und können

vom Benutzer beliebig gewählt werden. Fortlaufende Nummern der Handlungslisten haben keine Bedeutung für den chronologischen Ablauf der Handlung.

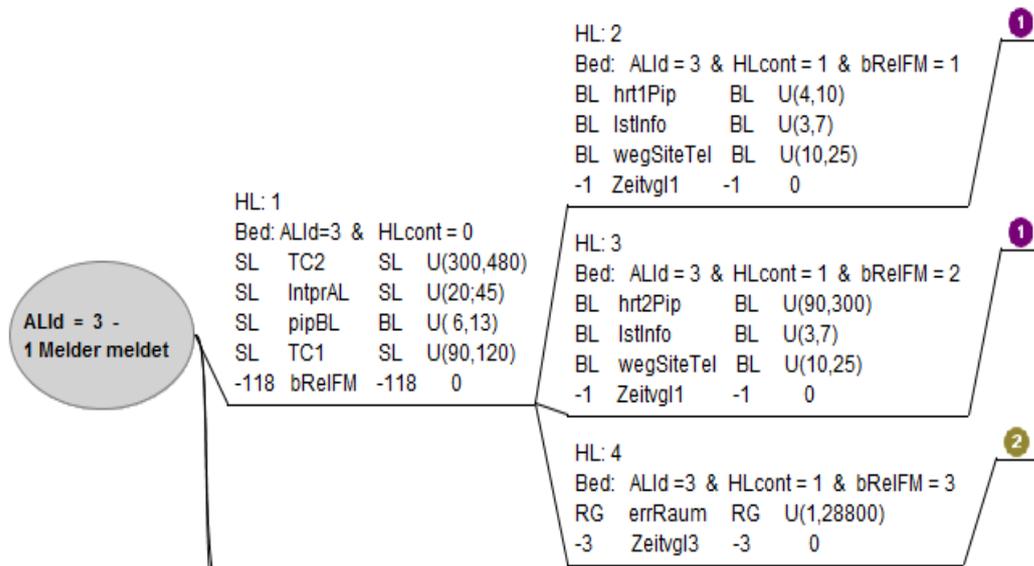


Abb. A.1 Handlungsablauf und Basishandlungen der Handlungslisten unter der Bedingung, dass nur ein Brandmelder Alarm auslöst

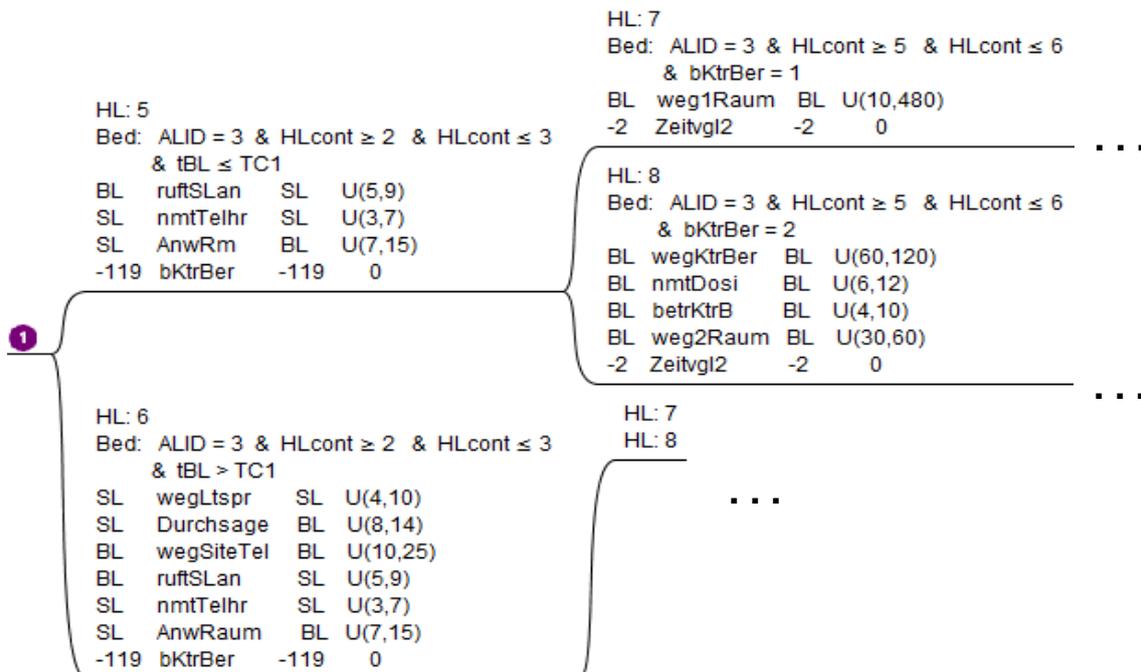


Abb. A.2 Handlungsablauf und Basishandlungen der Handlungslisten unter der Bedingung, dass nur ein Brandmelder Alarm auslöst (Fortsetzung 1)

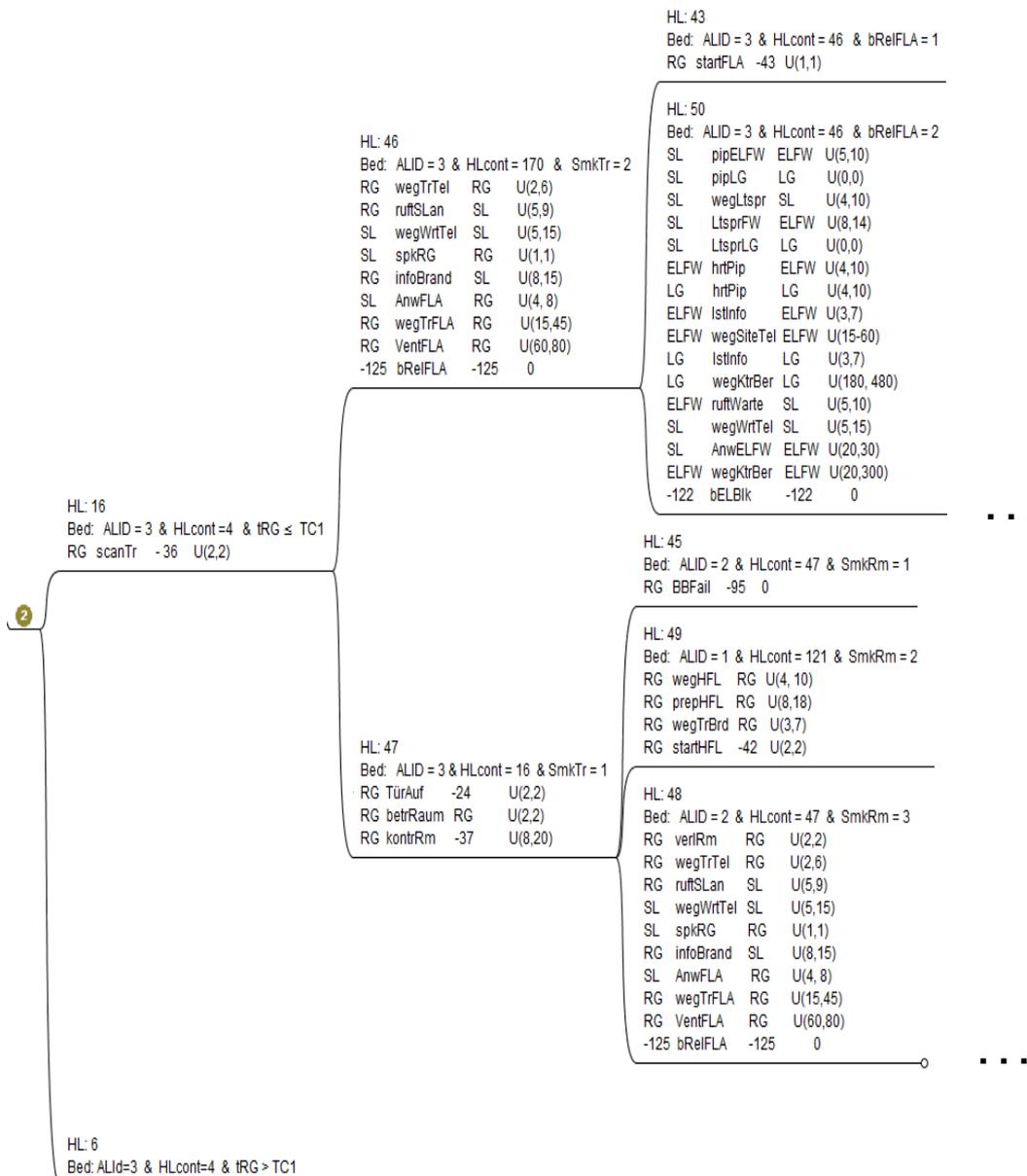


Abb. A.3 Handlungsablauf und Basishandlungen der Handlungslisten unter der Bedingung, dass nur ein Brandmelder Alarm auslöst (Fortsetzung 2)

A.1 Beschreibung der Handlungslisten in Abb. A.1

- **HL1:** HL1 wird unter der Bedingung aktiviert, dass
 - die Meldung von nur einem Melder ansteht ($ALLd = 3$) und
 - noch keine Handlung durchgeführt wurde ($HLcont = 0$).

Die im Ablauf der HL1 gekennzeichneten Basishandlungen TC1 und TC2 bezeichnen Zeitähler. Mit den Zeitählern werden in diesem Fall verschiedene Zeitspannen modelliert, wie lange der SL auf die Rückmeldung des BL wartet, bevor er bestimmte weitere Aktionen durchführt.

Laut Brandschutzordnung muss der SL den Feueralarm 5 – 8 Minuten nach Brandmeldung auslösen, wenn bis dahin der Brandläufer keine anderslautende Meldung über den vermeintlichen Brand im Raum erstattet hat. Die Auslösung des Feueralarms bedeutet, dass der Einsatzleiter der Feuerwehr (ELFW) und die Personen der Löschgruppe (LG) alarmiert werden. Die Zeit, die der SL auf den Rückruf des Brandläufers zur Verifikation des Brandes wartet, wird durch den Zeitähler TC2 festgelegt. Dabei wird angenommen, dass diese Wartezeit eine Zufallsvariable ist. In der Modellierung wurde für den Zeitähler TC2 eine Zufallszeit angenommen, die aus einer Gleichverteilung zwischen 5 und 8 Minuten zufällig ausgewählt wird (TC2, 300 – 480 s). Der Zeitähler TC2 wird aktiviert, sobald der Alarm des Brandmelders in der Warte eingeht und befindet sich deshalb an erster Stelle der Handlungsliste. Obwohl der Zeitähler keine auszuführende Handlung im eigentlichen Sinne darstellt, ist TC2 trotzdem dem SL als Person zugeordnet. Diese Zuordnung besagt, dass sich die Wartezeit des Zeitählers TC2 auf den SL bezieht.

Sobald die Meldung eines Brandmelders in der Warte eintrifft, geht der SL zum Ort des Druckers, liest und interpretiert die Alarmmeldung (IntprAL, 20 – 45 s). Für die Zeitdauer, die der SL benötigt, bis er die Alarmmeldung gelesen und interpretiert hat wird eine gleichverteilte Zufallszeit angenommen, die zwischen 20 s und 45 s liegt. Die Handlung wird mit 'IntprAL' abgekürzt (siehe Abb. A.1). Nach der Interpretation des Alarms und der damit verbundenen Entscheidung für das weitere Vorgehen, nimmt der SL den Funkmelder und versucht einen Brandläufer zu erreichen, der sich seines Wissens nach möglichst in der Nähe des gemeldeten Brandraums befindet (pipBL, 6 – 13 s). Bei dem Versuch den entsprechenden BL über den Funkmelder zu erreichen, können

zufallsbedingt verschiedene Situationen vorliegen. Die alternativen Situationen werden durch die Variable 'bRelFM' ausgedrückt, die in Abschnitt 2.2.1 beschrieben wurde.

Der Zeitzähler TC1 beschreibt die Zeit, wie lange der SL auf die telefonischen Rückruf des BL wartet, nach dem der SL ihn über den Funkmelder gerufen hat. Für die Zeitspanne des Zeitzählers TC1 wird eine Zufallsvariable angenommen, die in der Analyse zufällig aus einer Gleichverteilung zwischen 90 s und 120 s ausgespielt wird. D. h., sobald der SL den BL über den Funkmelder gerufen hat, wartet er eine bestimmte Zeit auf die Rückmeldung des BL (TC1, 90 – 120 s). Es wird angenommen, dass diese Wartezeit zufälligen Variationen unterworfen ist und zwischen 90 s und 120 s liegt. Diese Wartezeit wird durch den Zeitzähler TC1 festgelegt, der zum Zeitpunkt aktiviert wird, nachdem der SL den BL über den Piepser angerufen hat.

- **HL2:** HL2 wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3 und
 - HL1 zuletzt ausgeführt wurde (HLcont = 1) und
 - die Situation vorliegt, dass der Funkmelder ohne Zeitverzögerung vom BL gehört werden kann (bRelFM = 1).

In diesem Fall hört und reagiert der BL auf den Funkmelder (Piepser) nach kurzer Zeit (hrt1Pip, 4 – 10 s). Er liest die Information vom Piepser (IstInfo, 3 – 7 s) und geht von seinem aktuellen Standort zum nächsten erreichbaren Telefon, das je nach Standort in der Nähe oder etwas weiter entfernt sein kann (wegSiteTel, 10 – 25 s). Es wird deshalb angenommen, dass zum Erreichen des Telefons zwischen 10 und 25 s benötigt werden. Der Indikator mit dem Namen 'Zeitvgl1' zeigt an, dass an dieser Stelle im Handlungsablauf ein Zeitvergleich vorgenommen wird. Da der Zeitvergleich keine eigentliche Basishandlung sondern nur einen Indikator für einen Zeitvergleich darstellt, wird keine Zeitdauer für den Zeitvergleich angesetzt. Dieser spezielle Zeitvergleich ist mit -1 codiert (siehe Abb. A.1). Die Codierung legt fest, welcher Zeitvergleich durchgeführt wird. Die Codierung -1 bedeutet, dass die aktuelle Zeit, die der BL bisher benötigt hat, mit der Zeit des Zeitzählers TC1 verglichen wird. TC1 gibt die Zeit an, wie lange der SL auf den Rückruf des BL wartet. D. h., durch den Indikator 'Zeitvgl1' wird überprüft, ob sich der BL, nachdem er vom SL über den Funkmelder angerufen wurde, in der erwarteten Zeit beim SL gemeldet hat.

- **HL3:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3 und
 - HL1 zuletzt ausgeführt wurde (HLcont = 1) und
 - die Situation vorliegt, dass der BL den Funkmelder aus verschiedenen Gründen (siehe Abschnitt 2.2.1) erst nach einer mehr oder weniger großen Zeitverzögerung hören kann (bRelFM = 2).

HL3 beginnt mit der Basishandlung, dass der BL den Piepser erst nach einer mehr oder weniger großen Zeitverzögerung wahrnimmt (hrt2Pip, 90 – 300 s). Es wird angenommen, dass die Verzögerung zwischen 90 und 300 s betragen kann (z. B. wegen Funkloch oder Lärm). Danach werden die Basishandlungen analog zu denen von HL2 durchgeführt (siehe Abb. A.1). D. h., der BL liest die Information vom Piepser (IstInfo, 3 – 7s), geht von seinem aktuellen Standort zum nächsten erreichbaren Telefon (wegSiteTel, 10 – 25 s) und es wird ein Zeitvergleich mit dem Zeitzähler TC1 (Zeitvgl1) vorgenommen.

- **HL4:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3, HL1 zuletzt ausgeführt wurde (HLcont = 1) und die Situation vorliegt, dass BL über den Funkmelder nicht erreicht werden kann (bRelFM = 3).

Da der BL über den Funkmelder nicht erreicht werden kann, reagiert er nicht. Während seines Rundgangs erreicht der RG den Brandraum zu einer zufälligen Zeit innerhalb seiner 8-stündigen Schicht. (errRaum, 1 – 28800 s). Wenn RG am Raum ankommt wird der Zeitvergleich 'Zeitvgl3' vorgenommen (Zeitvgl3, 0 s). Der Indikator 'Zeitvgl3' ist mit -3 codiert (siehe Abb. A.1) und bedeutet einen Zeitvergleich, wann der RG am Brandraum ankommt mit der Wartezeit des SL, die im Zeitzähler TC1 spezifiziert ist.

A.2 Beschreibung der Handlungslisten der Abb. A.1

HL 5 bzw. HL 6 folgen den Handlungslisten HL 2 bzw. HL 3 in Abhängigkeit davon, ob der BL sich in der erwarteten Zeit beim SL gemeldet hat oder nicht. Wenn der BL in der erwarteten Zeit zurückruft ($tBL \leq TC1$) wird die Handlungsliste HL 5 aktiviert. Falls sich BL nicht in der erwarteten Zeit bei SL meldet ($tBL > TC1$) wird HL 6 aktiviert. Ob $tBL \leq TC1$ oder $tBL > TC1$ wird durch den Zeitvergleich 'Zeitvgl1' mit der Codierung -1 im Crew-Modul festgestellt.

- **HL 5:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3 und
 - HL2 oder HL3 zuletzt ausgeführt wurde ($HLcont \geq 2$ und $HLcont \leq 3$) und
 - der BL innerhalb der erwarteten Zeit, die durch den Zeitzähler TC1 spezifiziert ist, beim SL anruft ($tBL \leq TC1$).

BL befindet sich am Telefon und ruft den SL in der Warte an, indem er die Rufnummer der Warte eingibt (ruftSLan, 5 – 9 s). Der SL, der auf den Rückruf wartet, befindet sich in der Nähe des Telefons, hebt ab und meldet sich (nmtTelhr, 3 – 7 s). SL gibt dem BL die Anweisung, zum betreffenden Raum zu gehen und diesen auf einen eventuellen Brand hin zu kontrollieren (AnwBrdRm, 7 – 15 s). Für den weiteren Ablauf ist die Situation relevant ob sich der BL innerhalb oder außerhalb des Kontrollbereichs befindet, wenn er vom SL die Anweisung erhalten hat. Diese Situation wird durch die Variable 'bKtrBer' ausgedrückt, die näher in Abschnitt 2.2.1 beschrieben ist.

- **HL6:** Wird aktiviert, wenn:
 - ALId = 3 und
 - HL2 oder HL3 zuletzt ausgeführt wurde ($HLcont \geq 2$ und $HLcont \leq 3$) und
 - der BL nicht innerhalb der erwarteten Zeit (TC1) beim SL zurück ruft ($tBL > TC1$).

Da der BL sich nach dem Ruf über den Piepser nicht in der erwarteten Zeit beim SL gemeldet hat, geht der SL nach der Wartezeit TC1 zum Lautsprecher (wegLtspr, 4 – 10 s), um den BL über die Lautsprecheranlage zu rufen. Der SL setzt seine Durchsage mit Wiederholung über die Lautsprecheranlage ab (Durchsage, 8 – 14 s). Es wird angenommen, dass der BL die Durchsage über die Lautsprecheranlage auf jeden Fall hört und sich daraufhin von seinem aktuellen Standort zum nächsten Telefon begibt (wegSiteTel, 10 – 25 s). Die weiteren Basishandlungen entsprechen denen der HL5. D. h., der BL ruft den SL in der Warte an (ruftSLan, 5 – 9 s), der SL meldet sich (nmtTelhr, 3 – 7 s) und gibt dem BL die Anweisung, zum betreffenden Raum zu gehen und diesen auf einen eventuellen Brand hin zu kontrollieren (AnwBrdRm, 7 – 15 s). Danach erfolgt ein alternativer Handlungsablauf, der von der Situation abhängt, die durch die Variable 'bKtrBer' beschrieben wird (siehe Abschnitt 2.2.1).

Die Basishandlungen der Handlungslisten HL 7 und HL 8 folgen den Handlungslisten HL 5 und HL 6 in Abhängigkeit davon, ob sich der BL innerhalb oder außerhalb des Kontrollbereichs befindet, wenn er die Anweisung vom SL erhält.

- **HL 7:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3 und
 - HL 5 oder HL 6 zuletzt ausgeführt wurde ($HL\ cont \geq 5$ und $HL\ cont \leq 6$) und
 - der BL sich innerhalb des Kontrollbereich befindet ($bKtrBer = 1$).

Da der BL sich irgendwo innerhalb des Kontrollbereiches befinden kann, wird er für den Weg zum betreffenden Brandraum mehr oder weniger Zeit benötigen. Für den Weg wurde eine Zeit zwischen 10 s und 480 s angenommen ($weg1Raum$, 10 – 480 s). Die höheren Zeiten tragen der Situation Rechnung, dass sich der BL in einem vom Raum entfernten Teil des Kontrollbereichs befindet. Wenn der BL den Raum erreicht hat, wird ein Zeitvergleich vorgenommen ($Zeitvgl2$, 0 s). Dieser Zeitvergleich ist mit –2 codiert. Die Codierung –2 weist das Programm an zu überprüfen, ob sich der BL innerhalb des Zeitrahmens befindet, in dem er sich beim SL melden und Informationen über den Brand liefern soll. Der Zeitrahmen ist durch den Zeitähler TC2 festgelegt. Hat der BL zu viel Zeit benötigt, so dass er die Wartezeit des SL überschritten hat, dann löst der SL den Feueralarm aus und piepst dann den ELFW und die LG durch zwei untereinander liegende Knöpfe an. Diese Handlungen werden in der nachfolgenden Handlungslisten HL 50 aufgeführt, die jedoch an dieser Stelle nicht weiter beschrieben wird.

- **HL 8:** Wird aktiviert, wenn:
 - ALId = 3 und
 - HL 5 oder HL 6 zuletzt ausgeführt wurde ($HL\ cont \geq 5$ und $HL\ cont \leq 6$) und
 - der BL sich außerhalb des Kontrollbereichs befindet ($bKtrBer = 2$).

Der BL, der sich irgendwo außerhalb des Kontrollbereichs befindet, begibt sich auf den Weg zum Eingang des Kontrollbereichs ($wegKtrBer$, 60 – 120 s). Dabei wird angenommen, dass sich der alarmierte BL nicht allzu weit entfernt vom Eingang des Kontrollbereichs befindet. Beim Eingang des Kontrollbereichs angekommen, nimmt der BL einen Dosimeter, die dort in großer Zahl verfügbar sind ($nmtDosi$, 6 – 12 s) und betritt den Kontrollbereich. Da der BL nicht durch den Eingangsmonitor muss und direkt durch die Tür gehen kann, wird für das Betreten eine relativ kurze Zeit abgeschätzt

(betrKtrB, 4 – 10 s). Danach begibt er sich zum Brandraum, der in der Nähe zum Kontrollbereichseingang liegt (weg2Raum, 30 – 60 s). Danach wird eine Zeitabfrage mit der Codierung -2 vorgenommen, ob sich der BL noch innerhalb der erwarteten Zeit TC2 befindet, in dem er sich beim SL melden und Informationen über den Brand liefern soll (Zeitvgl2, 0 s).

Die Handlungslisten die der HL 7 und HL 8 folgen werden an dieser Stelle nicht weiter beschrieben.

A.3: Beschreibung der Handlungslisten in Abb. A.

HL 16 bzw. HL 6 folgen der HL 4 in Abhängigkeit davon, ob der RG innerhalb der gegebenen Wartezeit TC1 des SL am Brandraum eintrifft.

- **HL 16:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 1 und
 - HL 4 zuletzt ausgeführt wurde (HL cont = 4) und
 - der RG innerhalb der durch TC1 gegebenen Wartezeit des SL eintrifft ($t_{RG} \leq TC1$).

Der RG kommt an die Tür des betreffenden Brandraums. Während er sich der Tür nähert, kann er ggf. erkennen, dass Rauch unter der Tür austritt oder die Temperatur der Tür erhöht ist. Für die Zeit der kurzen Beobachtung der Tür wird ein fester Wert von 2 s angenommen (scnTr, 2 s). Diese Basishandlung erhält die Codierungsnummer -36, die dem Programm mitteilt, dass für den weiteren Handlungsablauf zu diesem Zeitpunkt spezielle Informationen aus der Simulation der Branddynamik benötigt werden.

Ob Rauch unter der Tür sichtbar ist, hängt von der bis dahin stattgefundenen Brandentwicklung ab und wird durch die optische Dichte am unteren Türspalt durch den verwendeten deterministischen Brandcode FDS berechnet. An dieser Stelle hängt der weitere Handlungsablauf davon ab, ob der Rauch unter der Tür sichtbar austritt oder nicht.

Die HL 6 wurde bereits weiter oben in A-2 beschrieben. Der Unterschied besteht darin, dass sie an dieser Stelle unter einer anderen Bedingung aufgerufen wird.

- **HL 6:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3 und
 - HL 4 zuletzt ausgeführt wurde (HL cont = 4) und
 - der RG nicht innerhalb der Zeit TC1 den Brandraum erreicht ($t_{RG} > TC1$).

Wenn der RG nicht innerhalb der Zeit TC1 den Brandraum erreicht, werden die Basis-handlungen der HL 6 ausgeführt, die in A-2 beschrieben sind.

Die Handlungslisten HL 46 und 47 folgen der HL 16, in der der RG die Situation vor der Tür des Brandraums erfasst. Erkennt der RG, dass Rauch unter der Tür des Brandraums sichtbar in den Flurbereich austritt – abhängig von der Brandentwicklung, die bis zu diesem Zeitpunkt stattgefunden hat, dann wird nach HL 16 die Handlungsliste HL 46 aktiviert. Bemerkt der RG keinen Rauchaustritt so folgt der HL 16 die Handlungsliste HL 47.

- **HL 46:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3 und
 - HL 16 zuletzt ausgeführt wurde (HL cont = 16) und
 - Rauch unter der Tür sichtbar hervortritt ($SmkTr = 2$)

Wenn der RG Rauch unter der Tür bemerkt, geht er zum nächst gelegenen Telefon (wegTrTel, 2 – 6 s) und ruft den SL an (ruftSLan, 5 – 9 s). Der SL, der sich irgendwo in der Warte befindet, geht zum Telefon (wegWrtTel, 5 – 15 s) und meldet sich (spkRL, 1 s). Der RG informiert den SL darüber, dass Rauch austritt (infoSmk, 7 – 15 s). In diesem Fall wird angenommen, dass der SL den RG während des Gesprächs anweist, die Feuerlöschanlage (FLA) zu manuell aktivieren, deren automatische Auslösung ausgefallen ist (siehe erste Annahme in Abschnitt 1.1). Die manuelle Auslösung erfolgt zunächst über den „Steuerschrank für die Sprühwasserlöschanlage direkt vor der Tür vom Flur zum Brandraum. Es wird angenommen, dass die Motorarmatur nicht läuft, da die Automatik ausgefallen ist. Deshalb muss man sich auf die andere Raumseite zur Ventilstation der FLA begeben. Dort ist das Motorgetriebe ausgekuppelt, das Ventil kann jedoch von Hand aufgefahren werden. Dabei kann die Absperrarmatur versehentlich zu verriegelt sein oder der BL bekommt S126 nicht von Hand auf.

Damit kann die FLA manuell nicht gestartet werden, ohne dass es an der Wasserversorgung liegt. Für die Zeit, die der RG zum Erreichen der Ventilstation der FLA benötigt, werden zwischen 15 und 45 s angenommen (wegTrFLA 15 – 45 s). Dabei wird der Möglichkeit Rechnung getragen, dass der RG nicht durch den Raum sondern einmal um den Reaktor herum laufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen. Für die benötigte Zeit, um das Ventil mit Hand zu öffnen, werden 60 – 80 s angenommen (VentFLA, 60 – 80 s). An diesem Punkt können sich verschiedene Abläufe in Abhängigkeit davon ergeben, ob die FLA manuell gestartet werden kann oder nicht. Die aleatorische Unsicherheit darüber wird durch die Variable 'bRelFLE' beschrieben (siehe Abschnitt 2.2.1).

Wenn die HL 46 in der Simulation der Brandbekämpfung abgearbeitet wurde, werden in Abhängigkeit davon, ob die FLA manuell gestartet werden kann oder nicht, nachfolgende Handlungslisten HL 43 bzw. HL 50 aktiviert.

- **HL 43:** Wird aktiviert, wenn:
 - ALId = 3 und
 - HL 46 zuletzt ausgeführt wurde (HL cont = 46) und
 - die FLA sich manuell starten lässt (bRelFLE = 1).

Wenn die FLA manuell gestartet werden kann, aktiviert der RG die FLA (startFLA, 1 s). Die Codierung -43 (siehe HL 43 in Abb. A.) zeigt dem Programm an, dass der RG die FLA erfolgreich aktiviert hat und die Löschung mittels der FLA beginnt. Die Löschung mittels der FLA wird durch die Simulation der Brandentwicklung bis zum Abbruchkriterium weiter fortgeführt.

- **HL 50:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3 und
 - HL 46 zuletzt ausgeführt wurde (HL cont = 46) und
 - die FLA sich nicht manuell aktivieren lässt (bRelFLA = 2).

Der SL gibt Feuersalarm (weil der Brand vom RG durch Rauchaustritt verifiziert wurde) und piepst dann den ELFW (pipELFW, 5 – 10 s) und gleichzeitig die LG (pipLG, 0 s) durch zwei untereinander liegende Knöpfe an. Da die LG gleichzeitig mit dem ELFW gerufen wird, werden 0 s für die Durchführung von pipLG angesetzt. Die Basishand-

lung pipLG muss trotzdem aufgeführt werden, da durch sie die LG die Information erhält, dass sie durch den SL über Piepser gerufen wurde und wann dies geschehen ist. LG und ELFW erhalten über den Funkmelder bereits Basisinformationen über den Brandort, in diesem Beispiel „Brand Kontrollbereich 1“. Nachdem der SL den ELFW und die LG über den Piepser gerufen hat, geht der SL zum dem Platz in der Warte, von dem aus er eine Lautsprecherdurchsage absetzen kann (wegLtspr, 4 – 10 s). Es wird angenommen, dass der SL den ELFW und die LG sowohl über Funkmelder als auch über die Lautsprecheranlage alarmiert. Über die Lautsprecheranlage werden der ELFW (LtsprELFW, 8 – 14 s) und gleichzeitig die LG (LtsprLG, 0 s) durch wiederholte Durchsagen gerufen. Es wird angenommen, dass der ELFW die Alarmierung entweder über den Funkmelder oder die Lautsprecherdurchsage wahrnimmt (hrtPip, 4 – 10 s). Unabhängig davon hört auch die LG den Piepser bzw. die Lautsprecherdurchsage (4 – 10 s). Der ELFW liest die Information auf seinem Piepser (IstInfo, 3 – 7 s), begibt sich von seinem aktuellen Standort zum nächst erreichbaren Telefon (wegSiteTel, 15 – 60 s). Gleichermaßen lesen die Personen der Löschgruppe die Meldung des Funkmelder bzw. reagieren auf die Durchsage des Lautsprechers (IstInfo, 3 – 7 s), wobei die Angehörigen der LG sich jeweils auf den Weg zum Kontrollbereich begeben. Es wird angenommen, dass die Mindestzahl der Personen, die eine LG bilden können nach 180s – 480 s am Eingang des Kontrollbereichs eingetroffen sind (wegKtrBer, 180 – 480 s). Des Weiteren wird die Situation ausgeschlossen, dass sich die Mehrheit der Feuerwehrangehörigen zum Kontrollbereich im falschen Block begeben.

Der ELFW ruft den SL in der Warte an (ruftWarte, 5 – 10 s). Der SL geht zum Telefon (wegWrtTel, 5 – 15 s), beschreibt dem ELFW die bisherige Situation und gibt entsprechende Anweisungen (AnwELFW, 20 – 30 s). Daraufhin begibt sich der ELFW zum Kontrollbereich, der vom aktuellen Standort des ELFW unterschiedlich weit entfernt sein kann. Zur Berücksichtigung dieser Unsicherheit wird für den Weg, den der ELFW bis zum Kontrollbereich zurücklegt, eine Zeit zwischen 20 und 300 s angenommen (wegKtrBer, 20 – 300 s). An diesem Punkt des Ablaufs können folgende zufallsbedingte alternative Situationen eintreten, die durch die Variable 'bELBIk' beschrieben werden (siehe Abschnitt 2.2.1).

- **HL 47:** Wird aktiviert, wenn
 - ALId = 3 und
 - HL 16 zuletzt ausgeführt wurde (HL cont = 16) und
 - kein Rauch unter der Tür sichtbar ist (SmkTr = 1)

Wenn dem RG, den Brandraum erreicht und er keinen Rauchaustritt unter der Tür bemerkt, öffnet er die Tür (TürAuf, 2 s) und betritt den Raum (betrRaum, 2 s). Da der RG bislang keine Information über einen Brand hat, wird er anhand der Rauchentwicklung im Raum die Situation einschätzen um zu beurteilen, welche Maßnahmen er ergreifen wird. Für die Dauer, um die Situation einzuschätzen und zu einer Entscheidung zu gelangen wird eine Zufallszeit zwischen 8 und 20 s geschätzt. Durch die Codierung -37 erhält das Programm die Information, dass der weitere Handlungsablauf von der Rauchentwicklung im Raum abhängt.

- **HL 45** wird unter der Bedingung aktiviert, dass
 - ALId = 3 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 47 gewesen ist (HL cont = 47) und
 - keine Rauchentwicklung im Raum sichtbar ist (bzw. durch SmkRm = 1)

Da die Rauchentwicklung so schwach ist, erkennt der RG den Brand nicht und verlässt nach seiner Kontrolle den Raum. In diesem Fall, der von der Brandentwicklung abhängt, findet keine Brandbekämpfung statt. Dies wird durch die Codierung -95 gekennzeichnet.

- **HL 49** wird unter der Bedingung aktiviert, dass
 - ALId = 3 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 47 gewesen ist (HL cont = 47) und
 - die Rauchentwicklung im Brandraum noch nicht so weit fortgeschritten ist, so dass der RG den Raum betreten kann, um den Brandherd mit dem Handfeuerlöscher zu bekämpfen (bzw. durch SmkRm = 2).

Die Rauchentwicklung ist noch nicht so weit fortgeschritten, dass der RG sich zum nächst gelegenen Handfeuerlöscher (HFL) begibt (wegHFL, 4 – 10 s). HFL befinden sich in größerer Anzahl in der Nähe des Raumes, so dass angenommen werden kann, dass die Löschung mit dem HFL unter diesen Bedingungen auf jeden Fall erfolgt. Die Zeit bis der BL den nächsten HFL erreicht wird zwischen 4 s und 10 s geschätzt. Der RG nimmt den HFL von der Halterung und bereitet ihn zur Löschung vor (prepHFL, 8 – 18 s). In den längeren Zeiten sind auch die Fälle eingeschlossen, in denen der RG

einen anderen HFL nehmen muss. Der RG begibt sich mit dem Handfeuerlöscher zum Brandherd (wegTrBrd, 3 – 7 s). Sobald der RG den Brandherd erreicht hat, beginnt er innerhalb von 2 s mit dem HFL den Brand zu bekämpfen. Dies wird durch die Codierung -42 gekennzeichnet.

- **HL 48** wird unter der Bedingung aktiviert, dass
 - ALId = 2 und
 - die zuletzt ausgeführte Handlungsliste die HL 47 gewesen ist (HL cont = 47) und
 - die Rauchentwicklung im Raum so groß ist, dass der RG den Raum nicht mehr betreten kann (SmkRm = 3).

Die Rauchentwicklung ist so groß, dass der RG den Raum sofort verlässt (verlRm, 2 s). Der RG begibt sich daraufhin zum nächst gelegenen Telefon (wegTrTel, 2 – 6 s). Der RG nimmt den Telefonhörer ab und wählt die Nummer der Warte (ruftSLan, 5 – 9 s). Der SL, der sich irgendwo in der Warte befindet geht zum Telefon (wegWrtTel, 5 – 15 s). Der SL nimmt innerhalb den Telefonhörer ab und meldet sich (spkRG, 1 s). Obwohl diese Aktion aus der Sicht des Zeitbedarfs von 1 s vernachlässigbar ist, muss sie dennoch eingefügt werden, um die Verbindung zwischen SL und RG herzustellen. Der RG informiert den SL darüber, dass im betreffenden Raum eine sehr starke Rauchentwicklung ist und er den Raum nicht betreten kann (infoBrand, 8 – 15 s). Der SL weist den RG an, die Feuerlöschanlage (FLA) manuell zu aktivieren, da er infolge der Rauchentwicklung im Raum davon ausgeht, dass die automatische Auslösung der FLA ausgefallen ist (AnwFLA, 4 – 8 s). Nachdem der RG die Anweisung vom SL entgegen genommen hat, begibt er sich zur Ventilstation, die sich auf der anderen Raumseite befindet. Dabei wird angenommen, dass die Motorarmatur nicht läuft, da die Automatik ausgefallen ist und deshalb die manuelle Auslösung nicht über den „Steuerschrank für die Sprühwasserlöschanlage direkt vor der Tür vom Flur zum Brandraum erfolgen kann (wegTrFLA, 20 – 45 s). Für den Weg zur Ventilstation auf der anderen Raumseite wird eine Zufallszeit zwischen 20 und 45 s angenommen. Dabei wird der Situation Rechnung getragen, dass der RG aufgrund der Rauchentwicklung nicht durch den Raum gehen kann, sondern einmal um den Reaktor herum laufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen. Am Ventil ist das Motorgetriebe ausgekuppelt. Das Ventil kann jedoch von Hand aufgefahren werden (VentFLA, 60 – 80 s). Beim Versuch das Ventil von Hand aufzufahren besteht die Möglichkeit, dass die Absperrarmatur versehentlich zu stark verriegelt ist oder der RG das Ventil nicht von Hand aufbekommt.

Damit kann die FLA ihre Funktion nicht erfüllen, ohne dass es an der Wasserversorgung liegt. Diese zufallsbedingte Situation wird durch die Variable 'bRelFLA' beschrieben (siehe Abschnitt 2.2.1).

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

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

ISBN 978-3-944161-11-2