

**Beurteilung der
menschlichen
Zuverlässigkeit in
PSA für übergreifende
Einwirkungen**

Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit in PSA für übergreifende Einwirkungen

Werner Faßmann
Jörg Peschke

August 2018

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrundeliegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4715R01575 durchgeführt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH ausgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

GRS - 516
ISBN 978-3-947685-01-1

Deskriptoren:

dynamische HRA, MCDET/Crew-Modul, menschliche Zuverlässigkeitsanalyse (HRA), PSA, Stress, übergreifende Einwirkungen, Unsicherheit, zeitliche Abhängigkeit

Kurzfassung

Unfallabläufe, die sich durch übergreifende Einwirkungen in Kernkraftwerken ergeben können, sind durch Wechselwirkungen zwischen den Handlungen des Anlagenpersonals, dem System- und Prozesszustand sowie stochastischen Einflüssen im zeitlichen Ablauf gekennzeichnet.

In der GRS wurde das Crew-Modul entwickelt, mit dem ein Handlungsablauf, der sich durch die arbeitsteilige Ausführung von Handlungen durch die Schichtmannschaft ergibt, als ein dynamischer Ablauf von Handlungen modelliert und simuliert werden kann. Dabei können Abhängigkeiten des Handlungsablaufs von Prozesszuständen, zufälligen Einflüssen und zeitlichen Wechselwirkungen berücksichtigt werden.

Die Methodik des Crew-Moduls wurde für das Anwendungsbeispiel eines Brandszenarios mit Brandbekämpfungsmaßnahme angewendet. Die Brandbekämpfungsmaßnahme wurde dabei als dynamischer Handlungsablauf modelliert und simuliert. Die Besonderheit der dynamischen Analyse der Brandbekämpfungsmaßnahme unter Verwendung des Crew-Moduls bestand dabei darin, dass der Faktor Stress als dynamische Größe in das Handlungsmodell eingebunden wurde. In dem Modell wurde gezeigt, dass sich unter bestimmten Bedingungen hoher Stress einstellen kann, der sich nicht global auf alle beteiligten Personen beziehen muss, sondern auch nur einzelne Personen betreffen kann. Es wurde gezeigt, wie es in Abhängigkeit der Stressentwicklung zu unterschiedlichen Entscheidungsfindungen kommt und welche Handlungsabläufe sich aus den Entscheidungen ergeben. Dabei wurden Unsicherheiten bzgl. verschiedener Entscheidungsalternativen berücksichtigt.

Es konnte gezeigt werden, dass mit der vorgeschlagenen Methode sowohl der Einfluss der Stressentwicklung allgemein als auch der Einfluss getroffener Entscheidungen unter hohem Stress auf die Zuverlässigkeit einer Handlung probabilistisch quantifiziert werden kann.

Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades, mit dem eine Modellierung menschlicher Handlungen unter der Verwendung der Methode des Crew-Moduls möglich ist, lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass sich die Methode generell zur systematischen Anwendung der dynamischen Analyse menschlicher Handlungen bei Ereignisabläufen aus übergreifenden Einwirkungen von innen wie außen eignet.

Abstract

Accident sequences in nuclear power plants resulting from hazards are characterized by time dependent interactions between human actions of the plant personnel, the states of systems and processes, and stochastic influences.

GRS has developed the so-called Crew Module enabling the analyst to model and simulate a time dependent sequence of actions as a dynamic sequence of actions resulting from performing work-sharing actions by the shift personnel. Dependencies of the sequence of actions on the process states, random influences and interactions over time can be adequately considered in the approach.

The methodology of the Crew Module has been applied to the example of a fire scenario with fire extinguishing. The fire extinguishing measure was modelled and simulated as a dynamic sequence of actions. One particularity of a dynamic analysis of the fire extinguishing measure with the Crew Module was modelling the factor stress as a dynamic parameter in the model of actions. It could be shown in the model that a high stress level can occur under certain conditions, which is not affecting all persons involved but only individual persons. It was demonstrated how the decision making may differ depending on the stress development and lead to different sequences of actions. Uncertainties with respect to different alternatives in decision making were also considered.

It could be demonstrated that with the proposed methodological approach the influence of the stress development in general as well as the effects of decisions made under high stress the reliability of a human action can be probabilistically quantified.

Due to the high level of detail of modelling human actions by using the Crew Module it can be concluded that this method is applicable in general for systematically analysing human actions in event sequences from internal and external hazards.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
	Abstract.....	II
1	Einführung	1
2	Zielsetzung.....	5
3	Arbeitsschritte und Gliederung des Berichts	7
4	Weiterentwicklungen der Methodik für die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit in einer MCDET-basierten dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse.....	11
4.1	Überblick über die Schritte der Methodenweiterentwicklung	11
4.1.1	Bewertungsmethodik zur menschlichen Zuverlässigkeit und zur Quantifizierung aleatorischer Unsicherheit von Ausführungszeiten relevanter Handlungen	11
4.1.2	Herausforderungen aus der Bewertung der Diagnose nach Swain	21
4.1.3	Stress	25
4.1.4	Weitere leistungsbestimmende Faktoren	36
4.1.5	Bewältigung überlagerter Ereignisse.....	43
4.2	Anwendungsorientierte Dokumentation der methodischen Weiterentwicklungen.....	50
4.2.1	Einschlägige Regelungen der Betriebsanforderung	50
4.2.2	Entscheidungsfehler	57
4.2.3	Diagnostische Aktivitäten.....	61
4.2.4	Leistungsbestimmende Faktoren	64
5	Exemplarische Anwendung der Methodik im Rahmen einer dynamischen Analyse menschlicher Handlungen bei übergreifenden Einwirkungen	69
5.1	Relevante Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in einer menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse	70

5.1.1	Abhängigkeit der Zuverlässigkeit einer menschlichen Handlung von zeitlichen Einflüssen	70
5.1.2	Abhängigkeit menschlicher Handlungen vom Systemzustand	76
5.1.3	Abhängigkeit menschlicher Handlungen von zufälligen Einflüssen	79
5.1.4	Wechselwirkungen von Stress und menschlichen Handlungen bei übergreifenden Einwirkungen	81
5.2	Methodik zur dynamischen Analyse.....	84
5.3	Beschreibung und Modellierung des Anwendungsfalls	85
5.4	Ergebnisse des Anwendungsbeispiels.....	114
5.4.1	Geringe Rauchentwicklung im Brandraum.....	114
5.4.2	Starke Rauchentwicklung im Brandraum	118
5.5	Fazit zum Anwendungsbeispiel.....	130
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	133
	Literatur.....	139
	Abkürzungen und Begriffe.....	143
	Abbildungsverzeichnis.....	145
	Tabellenverzeichnis.....	147

1 Einführung

Bei einem Ereignis in einer Anlage handelt es sich um einen Vorfall, der die Sicherheit dieser Anlage beeinträchtigen kann. Dazu zählen entsprechend /BMU 15/ auch sogenannte übergreifende Einwirkungen von innen und außen. Als übergreifende Einwirkungen werden diejenigen Einwirkungen bezeichnet, die unabhängig vom Anlagenbetriebszustand auftreten und die Anlage schädigend beeinflussen können. Charakteristisch ist, dass übergreifende Einwirkungen zu sogenannten auslösenden Ereignissen in einem Kernkraftwerk führen können. Diese sind im Methodenband zum PSA-Leitfaden /FAK 05/ wie folgt definiert: *„Für den Leistungsbetrieb werden Störungen und Schäden an Komponenten und Anlagenteilen, die eine Anforderung von Sicherheitssystemen auslösen, als "auslösende Ereignisse" bezeichnet. Im Nichtleistungsbetrieb werden solche Ereignisse als „auslösend“ bezeichnet, bei denen die Systemfunktionen zur Brennelementkühlung nicht im erforderlichen Umfang verfügbar bzw. bei denen die Systemfunktionen zur Reaktivitätskontrolle nicht ausreichend wirksam sind.“*

Übergreifende Einwirkungen von außen (EVA) haben ihre Ursache außerhalb des Anlagengeländes. Dabei wird zwischen naturbedingten (wie z. B. Erdbeben oder Hochwasser) und zivilisationsbedingten, sogenannten zivilisatorischen Einwirkungen (wie einem unfallbedingten Flugzeugabsturz), unterschieden. Bei übergreifenden Einwirkungen von innen (EVI) handelt es sich um Einwirkungen (wie Brand, Explosion oder Absturz schwerer Lasten), die auf dem Anlagengelände innerhalb oder auch außerhalb von Gebäuden auftreten. Gegen übergreifende Einwirkungen kann je nach Anlagentyp und -gegebenheiten durch unterschiedliche Maßnahmen Vorsorge im Rahmen der Auslegung getroffen werden.

Mit zunehmender Komplexität technischer Systeme kann davon ausgegangen werden, dass der Schweregrad der Konsequenzen erheblich sein kann, den Einwirkungen von innen oder außen durch ihren übergreifenden Einfluss auf die baulichen Anlagenteile, Systeme und Komponenten (Englisch: SSC – structures, systems and components) einer Anlage haben können. Die Schädigungen, die sich nach dem Auftreten übergreifender Einwirkungen ergeben, können durch kaskadierende Effekte sehr vielfältig und von unterschiedlichem Ausmaß sein. Der Mensch mit seinen Entscheidungen und Handlungen stellt oftmals die letzte Möglichkeit dar, die Auswirkungen solcher Gefahren zu beeinflussen.

Deutsche Kernkraftwerke verfügen über Notfalleinrichtungen und Notfallprozeduren für Situationen, in denen es zu auslegungsüberschreitenden Ereignissen kommt. In diesen Fällen spielen Personalhandlungen eine zentrale Rolle, da zur Wiederherstellung eines sicheren Anlagenzustands bzw. zur Vermeidung oder Verminderung unerwünschter Konsequenzen menschliche Eingriffe erforderlich sind. Die Bewältigung von Notfällen kann neben regelbasierten, d. h. schriftlich festgelegten Prozeduren auch wissensbasiertes Handeln erfordern, in dem vom Personal ad hoc eine geeignete Vorgehensweise in einer unbekanntem Situation zu entwickeln und anzuwenden ist.

Aufgrund der Vielfältigkeit und Unvorhersehbarkeit der Bedingungen, die nach übergreifenden Einwirkungen auftreten, können die Handlungen, die das Personal durchführen muss, um die Anlage abzufahren und eine Freisetzung radioaktiven Materials zu verhindern, oftmals nicht durch regelbasierte Maßnahmen festgelegt werden. Vielmehr ist das Personal in solchen Fällen gezwungen, wissensbasierte Aktionen durchzuführen, die erhebliche kognitive Leistungen und Entscheidungen erfordern. Mit dem Auftreten übergreifender Einwirkungen sind oftmals kaskadierende Effekte verbunden, die verschiedenartige Systemausfälle sowie Zerstörungen der Infrastruktur innerhalb und außerhalb der Anlage zur Folge haben können. Diese Situationen stellen eine extreme Belastung für das Personal dar, da sie ungewohnte und verschiedenartige Probleme zu bewältigen haben.

Aufgrund der ungewohnten und schwierigen Bedingungen, denen das Personal bei übergreifende Einwirkungen gegenüberstehen kann und welche es zu bewältigen hat, ist davon auszugehen, dass sich in solchen Fällen der Stresslevel des Personals dermaßen erhöhen kann, so dass sich der erhöhte Stress auf die Zuverlässigkeit der durchzuführenden Handlungen auswirkt.

Die Betriebserfahrung zeigt, dass das Handeln des Menschen bei auslösenden Ereignissen, die sich durch übergreifende Einwirkungen von innen oder außen auf eine kerntechnische Anlage ergeben, im Unfallablauf eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. Beherrschung des Ereignisses bzw. Minderung seiner Folgen können zum Teil erheblich von der Zuverlässigkeit der zugehörigen Handlungen des Personals abhängen. Die Zuverlässigkeit des Handelns ist ihrerseits wesentlich durch die Wirkung leistungsbestimmender Faktoren bestimmt, denen das Handeln unterliegt. Das Personal kann bei Ereignissen aus übergreifenden Einwirkungen insbesondere erheblichem Stress mit mehr oder minder großer Wirkung auf Handeln, Leistung und Zuverlässigkeit ausgesetzt sein. Entsprechend wichtig ist es, diese leistungsrelevanten Effekte beurteilen zu können.

Dies gilt auch für probabilistische Sicherheitsanalysen, deren Aussagekraft auch davon abhängt, das menschliche Handeln und die Faktoren, von denen es abhängt, angemessen zu erfassen, zu modellieren und zu bewerten.

Bisherige probabilistische Sicherheitsanalysen haben nur mit erheblichen Vereinfachungen berücksichtigt, wie menschliche Handlungen auf den Ereignisablauf infolge übergreifende Einwirkungen beitragen, welche konkreten Herausforderungen mit der Bewältigung solcher Ereignisabläufe einhergehen und welche Unsicherheiten die Analyse und die Bewertung des Handelns unter Stress in Rechnung zu stellen haben. Dieser eingeschränkte Erkenntnisstand geht auch darauf zurück, dass die vorhandenen Methoden die Spezifikation der Bewältigung der Ereignisabläufe bei übergreifenden Ereignissen noch nicht angemessen erfassen können. Zu diesen Besonderheiten gehören

- der bereits angesprochene Stress,
- die Koordination der Arbeiten zur Bewältigung der verschiedenen Ereignisse, die eine übergreifende Einwirkung nach sich zieht,
- die damit verbundene Aufteilung des Personals und der sonstigen Ressourcen,
- eine eventuelle Zusammenarbeit und Abstimmung mit externen Stellen, wie z. B. der Polizei,
- die mehr oder minder hohe Dynamik der Ereignisabläufe (beispielsweise die schnelle Ausbreitung brennenden Flugzeugtreibstoffs),
- vor allem aber die enge Vernetzung und Wechselwirkung dieser Herausforderungen, die methodisch ausreichend genau zu erfassen, zu modellieren und zu einem aussagekräftigen Gesamtergebnis zusammenzuführen sind, welches z. B. Schlussfolgerungen über erforderliche weitere Vorkehrungen unterstützt.

Neuere methodische Entwicklungen und Anwendungen bieten Ansätze, um derartige Lücken zu schließen:

- Um stochastische Einflüsse, deren variierende Werte auch als aleatorische Unsicherheiten bezeichnet werden, umfassend in deterministischen Rechnungen berücksichtigen zu können, wurde im Vorhaben RS1111 die Methode MCDET (*Monte Carlo Dynamic Event Tree*) /HOF 01/ zur Durchführung einer probabilistischen Dynamikanalyse entwickelt und in dem gleichnamigen Werkzeug implementiert.

- Um die probabilistische Dynamikanalyse unter Verwendung von MCDET auch für menschliche Handlungsabläufe anwenden zu können, wurde im Vorhaben RS1148 /PES 06/ mit dem Crew-Modul eine Methode entwickelt, mit der menschliche Handlungsabläufe detaillierter modelliert und analysiert werden können. Die Zielsetzung bestand darin, menschliche Handlungsabläufe als dynamischen Ablauf unter Berücksichtigung stochastischer Einflussgrößen sowie in Abhängigkeit von System- und Prozesszuständen modellieren und simulieren zu können. Durch die Verbindung des Crew-Moduls mit der MCDET-Methodik können die Wechselwirkungen zwischen menschlichen Handlungen, System- und Prozesszuständen sowie Einflüssen stochastischer Ereignisse umfassend berücksichtigt werden.
- Zudem haben Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der menschlichen Zuverlässigkeit zu Modellen und Bewertungsmethoden geführt, um kognitive Faktoren, wissensbasiertes Handeln und Stress im Rahmen einer probabilistischen Sicherheitsanalyse unter Berücksichtigung weiterer Rahmenbedingungen des Handelns wie z. B. die Qualität der Informationen auf Benutzungsoberflächen analysieren und bewerten zu können /FAS 10/, /FAS 14/. Konzeptionell wurden diese Modelle für die konventionelle, nicht-dynamische Methodik der probabilistischen Sicherheitsanalyse entwickelt. Entsprechende Weiterentwicklungen zur Nutzung in einer dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse waren Teil des Vorhabens RS1529 /PES 18/ und konnten im Vorhaben 4715R01575 eingesetzt und erweitert werden.

In der vorliegenden Untersuchung sollen deshalb fortschrittliche Methoden der probabilistischen Dynamik mit den neuesten Entwicklungen der Analyse und Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit verbunden werden, um den Beitrag menschlicher Handlungen bei Ereignisabläufen, die durch übergreifende Einwirkungen von außen bzw. von innen entstehen, detaillierter als bisher analysieren zu können. Die Arbeiten verfolgen im Einzelnen die in Kapitel 2 aufgeführten Ziele.

2 Zielsetzung

Ziel der Arbeiten sind die nachfolgenden Entwicklungen und Anwendungen der Methodik für die Analyse und Bewertung menschlichen Handelns im Rahmen einer MCDET-basierten, dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse:

- Es sollte ein methodischer Ansatz bereitgestellt werden, mit der man das Handeln der Personen, die an der Bewältigung von Ereignisabläufen bei übergreifenden Einwirkungen mitwirken, in seiner zeitlichen Entwicklung, ebenso den dabei auftretenden Stress und seine Änderungen im Ereignisablauf modellieren und simulieren kann. Die Methodik soll es zudem ermöglichen, Unsicherheiten, die sich durch stochastische Einflüsse aus einem übergreifenden Ereignis ergeben können, zu berücksichtigen.
- Weiterhin sollten Modelle, die für die Analyse und Bewertung mehr oder minder stressanfälliger, kognitiver Aktivitäten zwar zur Verfügung stehen, jedoch auf die Anwendung in einer nicht-dynamischen, klassischen probabilistischen Sicherheitsanalyse zugeschnitten sind, auf Einschränkungen untersucht werden, die ihrer Nutzung in der dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse entgegenstehen. Diese sollten so weiterentwickelt werden, dass diese Anwendung möglich ist. Die resultierenden Modelle sind in den zu entwickelnden methodischen Ansatz einzubinden.
- Die weiterentwickelte Methodik sollte beispielhaft anhand eines Brandszenarios und dessen Bekämpfung durch das Anlagenpersonal unter Berücksichtigung von Stress, unter dem das Personal bei dieser Aufgabe steht, erprobt werden.

Bei der Weiterentwicklung der Methodik sollten zudem Erkenntnisse aus der Task „Human Reliability Analysis in External Events PSA — Survey of Methods and Practice“ der Working Group on Risk Assessment (WGRISK) des Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSN) der OECD Nuclear Energy Agency (NEA) genutzt werden.

3 Arbeitsschritte und Gliederung des Berichts

Die nachfolgend genannten Arbeitsschritte dienen dazu, die in Kapitel 2 aufgeführten Ziele des Vorhabens zu erreichen:

- Um eine dynamische Analyse auch für menschliche Handlungsabläufe anwenden zu können, wurde in der GRS mit dem Crew-Modul eine Methode entwickelt, mit der menschliche Handlungen als dynamische Handlungsabläufe modelliert und simuliert werden können. Das Crew-Modul ist in Verbindung mit MCDET für die dynamische probabilistische Sicherheitsanalyse so weiterzuentwickeln, dass der Anwender generell den Beitrag von Faktoren, die die Zuverlässigkeit des Handelns beeinflussen, systematisch in die Modellierung der Personalhandlungen einbeziehen kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Beitrag dieser Faktoren als dynamische Größe modelliert und in Abhängigkeit vom Systemzustand, zufälligen Einflüssen sowie vom Erfolg bzw. Misserfolg vorangehender Handlungen modelliert werden kann.
- Insbesondere ist der Faktor Stress als dynamische Größe zu modellieren, die sich u. U. auch innerhalb kurzer Zeit so ändern kann, dass nachhaltige Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der anschließenden Handlungen zu erwarten sind. Man denke z. B. an die stressmindernde Wirkung eines Teilerfolges, welcher eine weitere Verschlimmerung des Anlagenzustands aufschiebt und dem Personal mehr Zeit für die Ausführung erforderlicher Prozeduren gibt. Teilerfolge können den Anlagenzustand eventuell auch derart verbessern, dass bestimmte Gefahren – z. B. durch ionisierende Strahlung – gebannt sind und die Akteure unter entsprechend weniger Stress stehen. Denkbar ist aber auch zusätzlicher Stress, wenn benötigte technische Einrichtungen ausfallen oder sich der Ereignisablauf schneller als erwartet entwickelt und die Zeit für die Anwendung erforderlicher Prozeduren schwindet. Man kann diesen generischen Ansatz für die Modellierung des Faktors Stress als dynamische Größe auf Ereignisabläufe unabhängig davon anwenden, ob der Ereignisablauf auf eine übergreifende Einwirkung zurückzuführen ist oder auf eine andere Ursache.
- Zur Berücksichtigung der besonderen Herausforderungen bei Ereignissen infolge übergreifender Einwirkungen ist für die Analyse- und Bewertungsmethodik auch eine Vorgehensweise zu entwickeln, um die Bewältigung von mindestens zwei überlagerten Ereignissen bzw. Einwirkungen in die Modellierung des Handlungsverlaufs und der Stressdynamik einbeziehen zu können. Beispiele solcher Herausforderungen sind u. a.: (1) die Aufteilung vorhandener technischer Hilfsmittel und des verfügbaren Personals, die mit der gleichzeitig laufenden Bewältigung mehrerer Ereignis-

nisse einhergehen kann, (2) die Koordination der Bearbeitung mehrerer erforderlicher Prozeduren und (3) die Zusammenarbeit mit externen Stellen. Folgen solcher Herausforderungen können u. a. in erhöhtem Arbeitsaufwand, Zeitdruck und damit verbundenem Stress bestehen.

- Ein weiterer Teil der Entwicklungsarbeiten besteht darin, die Bewertung der „Diagnose“, also der kognitiven Aktivitäten, aufgrund der Situation in Abhängigkeit von stressrelevanten Faktoren zu erkennen und Prozeduren zur Beherrschung der diagnostizierten Situation auszuwählen (vgl. /SWA 83/, Kap. 12), um diese mit der MCDET-Methodik zur probabilistischen Dynamikanalyse verbinden zu können. Die Verbindung der Diagnosebewertung nach Swain (/SWA 83/, Kap. 12) mit dem MCDET-Ansatz erfordert es, Einschränkungen zu überwinden, die sich aus dem Zugschnitt dieser Bewertungsmodelle für Diagnosen auf die Anwendung in nicht-dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalysen ergeben. Diese Einschränkungen bestehen darin, dass für die Diagnosebewertung nach dem Ansatz von Swain diejenige Zeit bekannt sein muss, die zur Erstellung der Diagnose zur Verfügung steht. Diese Zeit wird in der nicht-dynamischen Analysen durch Abschätzungen festgelegt, nach welcher Zeit die Handlung abgeschlossen sein muss und wie lange die Aktion der Handlung dauert. Anhand der für die Diagnose zur Verfügung stehenden Zeit wird mittels einer funktionalen Beziehung die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Diagnose ermittelt. In der dynamischen Analyse unter Verwendung von MCDET und dem Crew-Modul ergibt sich die zur Verfügung stehende Zeit für die Diagnose und die Erfolgswahrscheinlichkeit der Diagnose aus den Simulationsrechnungen mit dem Crew-Modul von MCDET. Somit kann die Diagnosebewertung nach Swain nicht direkt für den dynamischen Analyseansatz verwendet werden. Zur Überwindung dieser Einschränkungen waren Arbeiten aus dem parallel dazu durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben RS1529 des BMWi hilfreich /PES 18/. Weiterhin waren neuere Erkenntnisse zu Folgen von Stress für die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit bei einem Handeln, das in kognitiver Hinsicht als regelbasiert-routiniert einzustufen ist, in die Bewertungsmethodik einzubeziehen.
- Als Anwendungsfall dient eine Brandbekämpfungsmaßnahme, die in einem Vorgängervorhaben bereits untersucht und modelliert worden ist, ohne den Faktor Stress und seine Veränderungen im Ereignisablauf genauer zu berücksichtigen. Der bereits modellierte Handlungsablauf erfährt Erweiterungen um die Beiträge, den zur Handlungszuverlässigkeit leisten wird. Zudem wurden im Handlungsablauf denkbare Fehler berücksichtigt und für einzelne Handlungsausführungszeiten realistischere Ver-

teilungen angesetzt. Diese Erweiterungen erlauben es, die Leistungsfähigkeit des Crew-Moduls in Verbindung mit der MCDET-Methodik zu demonstrieren und zu diskutieren. In diesem Rahmen ist auch die Frage zu klären, ob sich die Methode generell zur systematischen Anwendung der Analyse menschlicher Handlungen bei Ereignisabläufen aus übergreifenden Einwirkungen sowie Ereigniskombinationen infolge mehrerer übergreifender Einwirkungen eignet.

- Die Mitarbeit in der Aktivität (Task) der WGRISK zur Human Reliability Analysis (HRA) bei PSA für Einwirkungen von außen ermöglicht es, Erkenntnisse zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit in den in den Mitgliedsländern durchgeführten PSA für Einwirkungen von außen, d. h. insbesondere PSA der Stufe 1 für Erdbeben, externe Überflutung und extreme Wetterereignisse, wie Starkwind etc., aus erster Hand in Erfahrung zu bringen und für die beschriebenen Arbeitsschritte zu nutzen.

Die weitere Dokumentation der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse gliedert sich in Kapitel zu den methodischen Weiterentwicklungen (Kapitel 4, insbesondere Abschnitt 4.1), zur Anwendung des entwickelten methodischen Ansatzes auf ein Brandszenario als ein Beispiel für eine übergreifende Einwirkung von innen mit manueller Brandbekämpfung (Kapitel 5) und zum Fazit, welches aus diesen Arbeiten in Bezug auf die Erreichung der Ziele des Vorhabens und weiterführende Fragestellungen zu ziehen ist (Kapitel 6). Erkenntnisse aus der WGRISK Task „Human Reliability Analysis in External Events PSA — Survey of Methods and Practice“ /NEA 18/ haben Eingang in das Kapitel zu den methodischen Weiterentwicklungen gefunden.

4 Weiterentwicklungen der Methodik für die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit in einer MCDET-basierten dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse

Das vorliegende Kapitel umfasst zwei Teile: Der erste gibt eine zusammenfassende Beschreibung der Schritte, mit denen Methodik für die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit in einer MCDET-basierten dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse im vorliegenden Projekt weiterentwickelt worden ist. Der zweite Teil präsentiert die erzielten Weiterentwicklungen in einer übersichtlichen, anwendungsfreundlichen Form. Im zweiten Teil findet der Anwender auch die konkreten Zahlen, die sich aus den Weiterentwicklungen für die quantitative Bewertung konkret ergeben.

4.1 Überblick über die Schritte der Methodenweiterentwicklung

„Weiterentwicklung“ bedeutet, einen gegebenen Stand zu vertiefen, zu erweitern und, soweit erforderlich, auch zu revidieren. Dieses Teilkapitel ist deshalb wie folgt aufgebaut:

Entsprechend der Zielsetzungen und dem Arbeitsprogramm wird für die Stressdynamik, für weitere leistungsbestimmende Faktoren sowie für die Diagnose und die Koordination der Auseinandersetzung mit mehreren Ereignisabläufen jeweils beschrieben,

- von welchem Erkenntnisstand die Weiterentwicklungen ausgehen,
- wie dieser Erkenntnisstand konkret weiterentwickelt worden ist und
- welche Ergebnisse die Weiterentwicklungen erbracht haben (Abschnitt 4.2 präsentiert die Resultate in kompakter Form für die Anwendung).

Diese Arbeiten bauen auf bestimmten Bewertungsmethoden auf. Diese Methoden werden als erstes erläutert, um das Verständnis der anschließend beschriebenen Entwicklungsarbeiten zu erleichtern.

4.1.1 Bewertungsmethodik zur menschlichen Zuverlässigkeit und zur Quantifizierung aleatorischer Unsicherheit von Ausführungszeiten relevanter Handlungen

Zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit in probabilistischen Sicherheitsanalysen stehen international zahlreiche, verschiedenartige Methoden bereit. Keine dieser Metho-

den hat bisher aber eine allgemeine Akzeptanz gefunden. Das zeigen insbesondere die vielfältigen Beiträge sowie die kontroversen Diskussionen zu den unterschiedlichen Methoden auf einschlägigen Fachkonferenzen wie PSAM und ESREL.

Diese Feststellung gilt insbesondere für die nicht-dynamische, „klassische“ PSA-Methodik. Bei einer Reihe dieser Methoden scheitert die qualifizierte Beurteilung der Anwendbarkeit bereits daran, dass dafür frei zugängliche Publikationen mit ausreichendem Detaillierungsgrad fehlen. Diese Einschränkung trifft nicht auf die Methoden THERP („Theory of Human Error Rate Prediction“ /SWA 83/) und ASEP („Accident Sequences Evaluation Program“ /SWA 87/) zu, die auch deshalb in verschiedenen Ländern genutzt werden (z. B. /FAK 05/) oder als eine Quelle für Methodenentwicklungsarbeiten herangezogen worden sind (z. B. /EDF 90/). THERP und ASEP erfassen wichtige Bereiche des Handelns und wesentliche leistungsbestimmende Faktoren, die für die menschliche Zuverlässigkeit bei der Überwachung und Führung von Kernkraftwerken betrachtet werden müssen. Zudem liegt für deutsche Kernkraftwerke die Empfehlung vor, diese Methoden für die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit in probabilistischen Sicherheitsanalysen zu nutzen /FAK 05/. Aus diesen Gründen haben einschlägige Projekte der GRS immer wieder auf THERP und ASEP Bezug genommen. Auch in diesem Vorhaben gehen die Weiterentwicklungen zu einem guten Teil auf die kritische Auseinandersetzung mit Ansätzen aus THERP und ASEP zurück.

Für die in der GRS durchgeführte Entwicklung des Crew-Moduls /PES 06/, /PES 14/ bestand die Zielsetzung darin, menschliche Handlungen als dynamischen Ablauf modellieren und simulieren zu können. Durch die Kopplung des Crew-Moduls mit der MCDET-Methode (siehe /HOF 01/, /KLO 06/) können die Handlungsabläufe von Personen in Abhängigkeit von System- und Prozesszuständen sowie in Abhängigkeit von stochastischen Einflüssen (aleatorische Unsicherheiten) modelliert und analysiert werden.

4.1.1.1 Motivation für die Entwicklung des Crew-Moduls

Bei der Entwicklung des Konzepts für das Crew-Modul lag die Motivation zugrunde, dass verschiedene relevante Aspekte, die in der Realität im Zusammenhang mit menschlichen Handlungen zu beobachten sind, möglichst detailliert bei der Modellierung menschlicher Handlungen berücksichtigt werden können. Dabei wurden insbesondere folgende Aspekte als relevant erachtet:

- Die Zuverlässigkeit einer Handlungsmaßnahme hängt nicht nur von der korrekten Ausführung der einzelnen Handlungsschritte ab, sondern auch von der Zeit, die zur Ausführung der Handlungsmaßnahme benötigt wird. Auch wenn alle Handlungen der Maßnahme ohne menschliche Fehler durchgeführt werden, kann es vorkommen, dass die Maßnahme als nicht erfolgreich bewertet werden muss. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn die einzelnen Handlungen der Maßnahme in Summe zu viel Zeit benötigen und die Maßnahme schließlich zu spät ausgeführt wird, so dass das beabsichtigte Ziel nicht mehr erreicht werden kann. Dies ist dann der Fall, wenn beispielsweise im Rahmen einer Brandbekämpfungsmaßnahme die Löschung des Brandes erst so spät erfolgt, dass sicherheitsrelevante Komponenten durch den Brand bereits geschädigt oder nicht mehr verfügbar sind. Für die Bewertung der Zuverlässigkeit einer menschlichen Handlung sind deshalb sowohl die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten menschlicher Fehler als auch die Zeit, mit der Handlungen ausgeführt werden, wichtige Einflussgrößen, die in einer menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse zu berücksichtigen sind.
- Eine Handlung, die eine Person (z. B. der Operateur) zur Erreichung eines bestimmten Zieles durchführt, benötigt eine gewisse Zeit, um ausgeführt zu werden. Die Zeit, die zur Ausführung einer Handlung benötigt wird, ist bei wiederholter Durchführung der gleichen Handlung in der Regel nicht konstant, sondern wird aus unterschiedlichen Gründen mehr oder weniger stark variieren. Aus diesem Grund sind die Ausführungszeiten menschlicher Handlungen als Zufallsgrößen zu betrachten. Die zufällig variierenden Zeiten, zu der eine bestimmte Handlung ausgeführt wird (z. B. Pumpe abschalten oder Ventil öffnen), haben einen unmittelbaren Einfluss darauf, wann der Zustand einer Komponente geändert wird und somit auf den weiteren physikalischen Prozess. Durch die variierenden Zeitpunkte (diese beschreiben eine aleatorische Unsicherheit), wann der Zustand einer Komponente durch eine menschliche Handlung geändert wird, können sich unterschiedliche Prozessentwicklungen im weiteren zeitlichen Verlauf ergeben. Aus diesem Grund ist es wichtig, die aleatorischen Unsicherheiten quantifizieren zu können, zu welchem Zeitpunkt bestimmte Handlungen im Rahmen einer menschlichen Maßnahme ausgeführt werden.
- Menschliche Handlungen werden oftmals durch ein Team von Personen durchgeführt, die miteinander kommunizieren und deren Aktionen von den Handlungen und Informationen der anderen Operateure abhängen können. Bestimmte Handlungen verschiedener Operateure können parallel durchgeführt werden und manche Handlungen können erst beginnen, sobald eine bestimmte Bedingung erfüllt ist. Die Be-

dingungen können durch einen bestimmten Zustand von Prozessgrößen gegeben sein (z. B. Temperatur > 310 °C etc.) oder aber durch die Information eines anderen Operators, der die erfolgreiche Beendigung seiner Tätigkeit mitteilt, wobei erst ab diesem Zeitpunkt mit der Durchführung anderer Handlungen begonnen werden kann. Diese Wechselwirkungen und zeitlichen Abhängigkeiten können ein wichtiger Einflussfaktor für einen menschlichen Handlungsablauf sein.

- Handlungsabläufe können erheblich durch zufällige Ereignisse beeinflusst werden. Typische Zufallsereignisse bestehen z. B. darin, ob ein Operator bzgl. einer durchzuführenden Handlung einen Fehler begeht oder ob eine Komponente, die der Operator zur Durchführung einer Maßnahme benötigt, verfügbar ist. Menschliche Fehlhandlungen können sich auf Fehler beziehen, die zu einem Unterlassen einer relevanten Handlung (error of omission) führen oder fehlerhafte Ausführungen einer Handlung (error of commission) zur Folge haben. Zufallsereignisse, die einen Handlungsablauf wesentlich beeinflussen können, sollten möglichst umfassend in einer menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden können, da diese einen Einfluss auf die Ausführungszeit relevanter Handlungen haben können.
- Menschliche Handlungen sind oftmals durch komplexe Wechselwirkungen gekennzeichnet. So kann der Zustand des Prozesses zu bestimmten Handlungen des Personals führen, wenn z. B. ein manueller Eingriff als Reaktion auf die Überschreitung eines Grenzwerts für diese Prozessgröße erfolgt. Personalhandlungen wie z. B. die Öffnung eines bestimmten Ventils können ihrerseits unmittelbare, aber auch mittelbare Auswirkungen auf Systemzustände und damit auf den weiteren Prozessablauf haben. In Bezug auf den Zeitfaktor können sich u. U. erhebliche Unterschiede im Ereignisablauf ergeben, je nachdem, ob das Ventil nach Erreichung des Grenzwertes quasi sofort oder erst nach einer längeren Zeitspanne geöffnet wird. Zu diesen zeitlichen Abhängigkeiten können auch organisatorische Faktoren beitragen, weil z. B. ein Eingriff vor Ort solange unterbleibt, bis die Person, die laut organisatorischen Regelungen bzw. Vorgaben schaltberechtigt und in der Anlage auf Rundgang ist, am Ort mit der Betätigungseinrichtung eintrifft. Auch die Zuverlässigkeit einer Handlung kann für den weiteren Ereignisablauf eine u. U. erhebliche Bedeutung haben. Man denke z. B. an die Fälle, dass die erforderliche Öffnung eines Ventils aus Versehen ganz unterbleibt oder aber so erfolgt, dass die Zufuhr einer benötigten Substanz entweder zu gering oder zu hoch ist. Wechselwirkungen zwischen Personen können z. B. in Form von Anweisungen bzw. Meldungen erfolgen und Zu-

fallseffekten unterliegen, was den Zeitpunkt, die Zeitdauer und die Zuverlässigkeit der Kommunikation betrifft.

Um diese Aspekte möglichst umfassend berücksichtigen zu können, wurde in der GRS mit dem Crew-Modul in Verbindung mit MCDET eine Methode entwickelt, mit der menschliche Handlungsabläufe als zeitabhängiger (dynamischer) Ablauf modelliert und simuliert werden können. In Verbindung des Crew-Moduls mit MCDET können Handlungsabläufe in Abhängigkeit von zufälligen Ereignissen sowie System- und Prozesszuständen modelliert und analysiert werden. Ein Anwendungsschwerpunkt des Crew-Moduls besteht darin, zum einen die Variation bzgl. des Zeitpunkts zu ermitteln, wann relevante Handlungen ausgeführt werden, die unmittelbare Auswirkungen auf die weitere Prozessentwicklung haben. Zum anderen soll auch die Abhängigkeit eines Handlungsablaufs von zufällig eintretenden Situationen berücksichtigt werden können, bei denen in Abhängigkeit der gegebenen Situation andere Handlungen durchgeführt werden müssen.

Das Crew-Modul in Verbindung mit dem GRS-Werkzeug MCDET erlaubt es, Wechselwirkungen, Abhängigkeiten und aleatorische Unsicherheiten, die bei menschlichen Handlungsabläufen auftreten können, umfassender berücksichtigen und analysieren zu können.

4.1.1.2 Konzept des Crew-Moduls

Im Gegensatz zur Modellierung physikalischer Prozesse, die durch physikalische Gesetzmäßigkeiten und mathematische Gleichungen definiert werden, können menschliche Handlungsabläufe und Entscheidungsprozesse, die ein bestimmtes Ziel verfolgen, im Allgemeinen nicht über mathematische Gleichungen beschrieben werden. Aus diesem Grund ist man gezwungen, dass mögliche Handlungsabläufe, die sich in Abhängigkeit stochastischer Einflussgrößen oder aus den Informationen verschiedener relevanter System- und Prozesszustände ergeben können, antizipiert und explizit beschrieben werden müssen.

Für das Konzept des Crew-Moduls wurden folgende Überlegungen zugrunde gelegt:

- Ein Handlungsablauf setzt sich aus einer Vielzahl einfacherer Einzelhandlungen (im Folgenden auch Basishandlung genannt) zusammen. Die Ausführung einer Basishandlung kann in der Regel einer bestimmten Person zugeordnet werden. Zur Aus-

führung einer Basishandlung wird eine gewisse Zeit benötigt. Die Erfahrung zeigt, dass der Mensch für die Ausführung der gleichen Handlung auch unter konstanten Ausführungsbedingungen normalerweise unterschiedlich viel Zeit benötigt. Ebenso wird auch die Reaktionszeit, mit der eine Person auf den Eintritt eines Ereignisses reagiert nicht konstant sein, sondern mehr oder weniger stark variieren. Diese zeitlichen Schwankungen ergeben sich aus vielfältigen Faktoren, die von der Art und dem Ausmaß der aktuellen Beanspruchung, Stress durch persönliche Probleme, Ablenkung durch andere Personen, bis hin zu individuellen Leistungsunterschieden (Tagesform) reichen. Demzufolge wird davon ausgegangen, dass die Ausführungszeit einer Handlung eine Zufallsgröße ist und somit einer aleatorischen Unsicherheit unterliegt, die durch eine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben wird. Wenn es sich bei den Basishandlungen überwiegend um einfache elementare Tätigkeiten handelt, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Verteilungen der Ausführungszeiten in der Regel relativ einfach mittels Expertenurteil abschätzen lassen, ohne auf Daten aus der Betriebserfahrung oder experimentelle Daten zurückgreifen zu müssen.

- Bei der Ausführung menschlicher Maßnahmen sind oftmals mehrere Individuen beteiligt, die miteinander kommunizieren und deren Handlungen von den Handlungen anderer Personen, von ergonomischen und kognitiven Faktoren und von der Wahrnehmung und Interpretation des Systemzustandes abhängen können.
- Informationen über den Zustand des Handlungsablaufs (und ggf. auch über den System- und Prozesszustand) erhalten die beteiligten Personen neben den Anzeigen in der Warte unter anderem auch über die Kommunikation, die zwischen ihnen stattfindet. Kommunikationen können unterlassen oder auch falsch verstanden werden. Dies kann zu Zeitverzögerungen, Unterlassungsfehlern oder Ausführungsfehlern führen, was wiederum Einfluss auf den Handlungsablauf und schließlich auf den Unfallablauf haben kann. Demzufolge stellt die Kommunikation zwischen den Personen eines Teams und deren Fehlerpotential einen wesentlichen Einflussfaktor dar, der sich auf den Handlungsablauf und letztlich auch auf die Zuverlässigkeit menschlichen Handelns auswirken kann.
- Kommunikationen zwischen Personen tragen wesentlich zur Durchführung eines Handlungsablaufs bei und sind in der Modellierung zu berücksichtigen.

Aufgrund dieser Überlegungen sieht das grundlegende Konzept des Crew-Moduls vor, einen komplexen Handlungsablauf, bei dem eine oder mehrere Personen beteiligt sind

und miteinander interagieren können, durch eine Vielzahl von einfachen Einzelhandlungen (Basishandlungen) zu beschreiben. D. h., das Konzept des Crew-Moduls zur Simulation von Handlungsabläufen als dynamischer Prozess besteht im Wesentlichen darin, eine durchzuführende Maßnahme in mehr oder weniger kleine Basishandlungen zu zerlegen.

Als Basishandlung wird hier eine abgeschlossene einfache Einzelhandlung verstanden, die von einer bestimmten Person ausgeführt wird. Basishandlungen können dabei einfache Tätigkeiten sein (z. B. Bedienung eines Schaltknopfes) oder auch Kommunikationen zwischen Personen beschreiben (z. B. Schichtleiter weist Reaktorfahrer an, Hauptkühlmittelpumpen abzustellen). Je feiner die Zerlegung eines komplexen Handlungsablaufs in einfachere Basishandlungen erfolgt, desto detaillierter kann der Handlungsablauf der zu bewertenden Maßnahme und die darin stattfindenden Wechselwirkungen modelliert und analysiert werden. Der Grad, wie fein eine Maßnahme in Basishandlungen zerlegt wird, steht im Ermessen des Benutzers.

Die Komplexität einer Basishandlung kann unterschiedlich hoch sein. Beispielsweise ist die Basishandlung ‚Elektriker führt Arbeiten am Reaktorschutz aus‘ komplexer zusammengesetzt als die Basishandlung ‚Schichtleiter liest Anzeige zum DE-Füllstand ab‘. Je elementarer (weniger komplex) eine Basishandlung definiert ist, desto leichter kann auch ein Zeitrahmen für die Ausführung der Handlung abgeschätzt werden. Bei der Spezifikation von Basishandlungen sollte darauf geachtet werden, dass die Basishandlung selbst nicht zu komplex ist und keine wichtigen Interaktionen beinhaltet, die dann in der Analyse nicht explizit berücksichtigt werden können. Es sollte deshalb versucht werden, zu komplexe Basishandlungen weiter zu zerlegen.

Jeder Basishandlung sind Attribute zugeordnet, die eine nähere Beschreibung der Basishandlung erlauben. Die Definition der Basishandlungen ist bisher auf folgende Attribute beschränkt:

- Identifikationsnummer der Basishandlung: Die Identifikationsnummern werden verwendet, um Handlungslisten zu erstellen die den Ablauf einer bestimmten Teilhandlung beschreiben. Jeder Basishandlung wird eindeutig eine Identifikationsnummer automatisch zugeordnet. Bisher erfolgt die automatische Zuordnung nach einer vereinfachten Systematik, die auf zehn Personen und 999 Basishandlungen pro Person beschränkt ist. Eine Identifikationsnummer besteht aus einer vierstelligen Zahl. Die erste Ziffer kennzeichnet die Person, auf die sich die Basishandlungen beziehen

(z. B. 1 - Schichtleiter, 2 - Elektriker etc.). Die restlichen drei Ziffern werden für die Basishandlung, die sich auf eine bestimmte Person beziehen, verwendet. Die ersten beiden Basishandlungen des Schichtleiters erhalten automatisch die Identifikationsnummern 1001 und 1002. Für jede neu hinzukommende Basishandlung des Schichtleiters wird die Identifikationsnummer um 1 erhöht, so dass die Identifikationsnummern der Basishandlungen des Schichtleiters Zahlenwerte von 1001 bis 1999 durchlaufen können. Entsprechend können für die Identifikationsnummern des Elektrikers Werte von 2001 bis 2999 vergeben werden.

Die gewählte Systematik der automatischen Vergabe der Identifikationsnummern, die mit der Einschränkung auf zehn Personen und 999 Basishandlungen pro Person verbunden ist, wurden für die erste Entwicklung des Crew-Moduls verwendet. Für die bisherigen Anwendungen hat die Einschränkung bisher ausgereicht. Eine Erweiterung der Systematik auf beliebig viele Personen und beliebig viele Basishandlungen pro Person ist jedoch in künftigen Weiterentwicklungen möglich.

- Angabe der Person, die die Basishandlung durchführt: Die Person kann durch die vom Benutzer gewählte Kurzbezeichnung (z. B. SL für Schichtleiter, RF für Reaktorfahrer) angegeben werden.
- Angabe der Person oder der technischen Komponente, die durch die Basishandlung beeinflusst wird: Diese Information, welche Person von der Handlung beeinflusst wird, ist wichtig, um den Zeitpunkt zuordnen zu können, wann diese Person durch die Handlung aktiviert wird oder eine bestimmte Information erhält. Entsprechend ist es für eine technische Komponente wichtig, in welcher Form die Beeinflussung der Komponente durch die Handlung erfolgt (z. B. Ventil wird geöffnet oder geschlossen) und zu welchem Zeitpunkt dies geschieht.
- Angabe der Zeit, die die Person für die Ausführung der Basishandlung benötigt: Die Ausführungszeit einer Basishandlung wird grundsätzlich als eine zufällige Größe betrachtet. Ausführungszeiten, die nur sehr kleinen zufälligen Variationen unterworfen sind, können jedoch auch als konstante Größen spezifiziert werden. Wenn die Ausführungszeit als Zufallsgröße spezifiziert wird, werden Minimalwert t_{\min} und Maximalwert t_{\max} des möglichen Zeitbereichs angegeben. Soll die Ausführungszeit als konstante Größe spezifiziert werden, wird der entsprechende konstante Wert zweimal eingegeben. Dadurch erkennt das Programm, welche der Ausführungszeiten als Zufallsvariable und welche Zeiten als konstante Werte in die Analyse eingehen. Die Spezifikation der entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen der zufälligen

Ausführungszeiten der Basishandlungen sowie deren zufällige Auswahl erfolgt mittels des GRS-Programms für Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen SUSAs. In SUSAs wird dabei für jede Basishandlung eine Wahrscheinlichkeitsverteilung spezifiziert (z. B. Gleichverteilung $U(t_{\min}, t_{\max})$), die die Unsicherheiten bzgl. der Ausführungszeiten für die jeweilige Basishandlung beschreibt. Nach der Spezifikation der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Ausführungszeiten der Basishandlungen kann über SUSAs eine Stichprobe von zufälligen Ausführungszeiten der jeweiligen Basishandlungen erzeugt werden, indem aus jeder Wahrscheinlichkeitsverteilung entsprechende Zufallswerte ausgespielt werden. Die ausgespielten Zufallswerte werden in einer Datei gespeichert und im Rahmen der Simulation des Handlungsablaufs mit dem Crew-Modul den Ausführungszeiten der entsprechenden Basishandlungen automatisch zugeordnet. Dadurch können die Auswirkungen der zufälligen Variationen der Ausführungszeiten der Basishandlungen auf den Handlungsablauf ermittelt werden.

- Kurzbeschreibung der Basishandlung: Dieses Attribut einer Basishandlung ist optional, da es für die eigentliche Simulation des Handlungsablaufs nicht benötigt wird. Es wird jedoch empfohlen, eine sinnvolle Kurzbeschreibung des Inhalts der jeweiligen Basishandlung zu geben. Damit wird die Beschreibung der simulierten Sequenzen des Handlungsablaufs erheblich vereinfacht.

Die Basishandlungen, in die ein Handlungsablauf zerlegt worden ist, werden sequentiell zusammengefügt, um bestimmte Teilhandlungen zu beschreiben. Diese sequentielle Abfolge von Basishandlungen wird als eine Handlungsliste bezeichnet. Eine Handlungsliste (Sequenz von Basishandlungen) endet dann, wenn der weitere Handlungsablauf von bestimmten Bedingungen abhängt, die z. B. durch Prozesszustände oder zufälligen Ereignissen gegeben sind. Mit den Handlungslisten können die Abhängigkeiten des Handlungsablaufs von zufälligen Einflüssen sowie System- und Prozesszuständen modelliert werden.

Als Datenquelle für die Quantifizierung der menschlichen Zuverlässigkeit einzelner Handlungen kann das Zahlenwerk aus THERP bzw. ASEP /SWA 83/, /SWA 87/ verwendet werden. Für die Wahl dieser Ansätze war neben den eingangs aufgeführten Gründen ausschlaggebend, dass THERP und ASEP die Bewertung eines Handlungsablaufs durch dessen Zerlegung in Einzelhandlungen, die Bewertung dieser Einzelhandlungen unter Berücksichtigung relevanter, leistungsbestimmender Faktoren (zu denen vor allem Stress, die Qualifikation der Ausführungen und das Design der Mensch-Maschine-

Schnittstellen bzw. der Prozeduren gehören) und die Zusammenführung dieser Einzelhandlungsbewertungen zu einem Gesamtergebnis vorsehen:

- THERP und ASEP stellen zum einen Daten für die Bewertung der Zuverlässigkeit einzelner Handlungen und der zugehörigen Unsicherheitsbänder bereit.
- Zum anderen unterstützen THERP und ASEP die Bewertung des Beitrags leistungsbestimmender Faktoren für jede einzelne Handlung. Der Anwender von THERP bzw. ASEP kann und muss den Beitrag der leistungsbestimmenden Faktoren also Handlung für Handlung getrennt ausweisen. Das bedeutet insbesondere für den Faktor Stress, dass man sowohl Unterschiede im Stress bei verschiedenen Handlungen im Allgemeinen, als auch speziell die evtl. Veränderungen des Stresses („Stressdynamik“) bei derselben Person, die nacheinander bestimmte Handlungen ausführt und dabei unterschiedlichem Stress unterliegt, erfassen und bewerten kann.
- THERP und ASEP erfüllen mithin eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung bestehender Bewertungsmethoden in MCDET: In THERP und ASEP liegt eine Zusammenstellung einzelner Handlungen und leistungsbestimmender Faktoren vor, in die ein Ereignisablauf zerlegt bzw. aus denen ein Ereignisablauf aufgebaut werden kann, und deren Quantifizierung nur noch die Abschätzung der Dauer ihrer Ausführung und der zugehörigen Zufallsschwankungen erfordert hat. Im Rahmen früherer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben wurden für eine Vielzahl von Handlungen diese Informationen zum Zeitbedarf der Ausführung einschließlich ihrer zufälligen Schwankungen bereitgestellt /PES 06/, /PES 14/. Diese Arbeiten stellen einen wichtigen Schritt zur Einbindung menschlichen Handelns in die MCDET-Methodik dar.

Bei diesen Arbeiten hat sich jedoch auch herausgestellt, dass die Zuverlässigkeitsbewertung der Diagnose, wie sie THERP und ASEP unterstützen, mit der grundlegenden Anforderung der MCDET-Methodik nicht unmittelbar vereinbar ist. Die Schwierigkeit besteht darin, dass der systematische, schrittweise Aufbau der Ereignisabläufe unter der Verwendung der dynamischen Methodik des Crew-Moduls ohne Vorgriff auf Informationen erfolgt, die in der Simulation erst zu einem späteren, u. U. mit großem zeitlichen Abstand vorliegen werden und daher zum aktuellen Zeitpunkt nicht als ein Ergebnis aus der Simulation vorliegen kann. Die Simulation müsste also Informationen zu einem Zeitpunkt nutzen können, die sie erst nach diesem Zeitpunkt erzeugen wird. In der klassischen (nicht-dynamischen) probabilistischen Sicherheitsanalyse entfällt dies, weil die Er-

eignisbäume unter Kenntnis der für die Ereignis- und Handlungsabläufe notwendigen kritischen Zeitpunkte, bis wann die Handlung durchgeführt sein muss, aufgebaut werden.

Diese Schwierigkeit tritt bei der Bewertung diagnostischer Aktivitäten mit dem Ansatz entsprechend THERP bzw. ASEP auf. Es besteht jedoch eine Möglichkeit, diese Problematik durch bestimmte Vorinformationen zu bewältigen. Diese Möglichkeit wurde, wie nachfolgend gezeigt, für die anstehende Methodenweiterentwicklung genutzt.

4.1.2 Herausforderungen aus der Bewertung der Diagnose nach Swain

Im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben RS1529 wurde ein Ansatz entwickelt um die Problematik der Bewertung von Diagnosen mit den Verfahren nach THERP und ASEP in einer dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse zu überwinden /PES 18/. Dieser Ansatz wird hier herangezogen und nachfolgend werden die Problematik wie der Lösungsansatz in enger Anlehnung an die Dokumentation in /PES 18/ zusammenfassend beschrieben.

Diagnosen umfassen die kognitiven Aktivitäten, die Lage zu erkennen und erforderliche Prozeduren auszuwählen (vgl. /SWA 83/, Kap. 12). Die Grundlage ihrer Bewertung bilden Zeit-Zuverlässigkeits-Kurven mit entsprechenden Unsicherheitsbändern.

Anwendungsbereich des Ansatzes nach Swain sind Szenarien, deren Erkennung mehr oder minder intensiv geschult worden ist, und regelbasierte Prozeduren. Man kann mit dem Ansatz nur den Fehler bewerten, dass die korrekte Diagnose bis zu einem bestimmten Zeitpunkt im Zeitfenster zwischen 0 und etwas über 10.000 Sekunden nicht erfolgt ist. Inhaltlich falsche Diagnosen („Fehldiagnosen“) mit der Folge einer Einleitung sicherheitstechnisch unzulässiger Handlungen liegen nicht im Anwendungsbereich dieses Ansatzes.

Man erkennt die Problematik einer Verbindung dieses Bewertungsansatzes mit der Methodik des Crew-Moduls, wenn man sich das konkrete Vorgehen bei der Bewertung mit diesem Ansatz verdeutlicht:

- Die Zeitspanne T_D für die korrekte Diagnose nach Ereigniseintritt zum Zeitpunkt $T = 0$ ergibt sich als Differenz aus dem Zeitintervall T_{MAX} ($T_{MAX} - T_0$), in dem das Personal die erforderliche(n) Prozedur(en) mit Erfolg auszuführen hat, um die Situ-

ation zu bewältigen, und dem Zeitaufwand T_A , den die Ausführung dieser Prozedur(en) erfordert: $T = T_{MAX} - T_A$. Das Zeitintervall bis zum Zeitpunkt T_{MAX} erstreckt sich mit anderen Worten vom Eintritt der zu bewältigenden Situation bis zu dem Zeitpunkt, ab dem erforderliche Prozedur(en) unwirksam bleiben, auch wenn das Personal sie korrekt (aber zu langsam) ausführt. Dieses Vorgehen ist für THERP und ASEP gleich. Beide Methoden unterscheiden sich dadurch, dass für das Screening-Verfahren mit ASEP konservativere Zeit-Zuverlässigkeitskurven zu nutzen sind (vgl. /SWA 83/, Abb. 12-3) als für das Verfahren THERP (siehe /SWA 83/, Abb. 12-4) für Bewertungen, die detaillierter als ein Screening sind. Zur Verwendung von THERP und ASEP: siehe die entsprechenden Ausführungen in Swain (vgl. /SWA 83/, Kap. 12, S. 12ff. und „Executive Summary in /SWA 87/).

- Swains Ansatz unterstützt also die Bewertung der Zuverlässigkeit, mit der die korrekte Diagnose spätestens erfolgt sein muss, damit bis zum kritischen Zeitpunkt T_{MAX} genug Zeit verbleibt, um die benötigte(n) Prozedur(en) mit Erfolg abzuschließen.

Im Rahmen der Methodik des Crew-Moduls ergeben sich T_A und T_{MAX} aus dem Ereignisablauf, sind also ein Endprodukt der entsprechenden Simulationen. Fehlen diese Zeitangaben zu Beginn der Simulationen, ist die Bewertung der Diagnose nach dem Ansatz von Swain (d. h. nach THERP bzw. ASEP) nicht möglich, weil man dort die Endresultate schon kennen müsste, um die Diagnose bewerten zu können. Die Bewertung der Diagnose nach dem Ansatz von Swain, wobei die Zuverlässigkeit der Diagnose von der für die Diagnose verfügbaren Zeit $T_D = T_{MAX} - T_A$ abhängt, würde die Anwendung des Crew-Moduls auf Fälle beschränken, bei denen die für die Diagnose verfügbare Zeit T_D im Vorfeld der Analyse bekannt ist.

4.1.2.1 Ansatz für die Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit in dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalysen

Im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben RS1529 /PES 18/ wurde ein Vorgehen zur Bewertung wissensbasierten Handelns entwickelt, mit der die Problematik der Diagnosebewertung im Rahmen dynamischer Sicherheitsanalysen auch für regelbasierte Diagnosen umgangen werden kann:

- Der Ereignisablauf ist soweit bekannt und überschaubar, dass Experten tragfähige Abschätzungen der Zeiten T_A und T_{MAX} inklusive ihrer aleatorischen Unsicherheiten abgeben können. Das entspricht insofern dem Vorgehen in der nicht-dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse als diese mit Mittelwerten für T_A und T_{MAX} ar-

beitet. Anhaltspunkte für Abschätzungen der Zeiten T_A und T_{MAX} und ihrer Verteilungen bieten idealerweise geeignete empirische Untersuchungen oder nutzbare Erkenntnisse aus der Betriebserfahrung.

- Man ersetzt den Bewertungsansatz nach Swain durch ein anderes Bewertungsverfahren, bei dem man sich auf eine Verteilung stützen kann, aus der für jeden Zeitpunkt $T > 0$ die Wahrscheinlichkeit hervorgeht, dass die Situation bis zu diesem Zeitpunkt T korrekt erkannt und die erforderliche Prozedur ausgewählt worden ist. Entsprechende Daten liegen aus empirischen Studien an Simulatoren mit US-amerikanischen Operateuren vor [WES 87]. Diese Daten bestehen aus Zeit-Zuverlässigkeitskurven für die Diagnose einer aus Übungen bekannten Situation und der Identifikation der regelbasierten Prozedur zur Bewältigung dieser Situation. Man muss also weder das maximale Zeitfenster für die Beherrschung der Situation (T_{MAX}) noch den Zeitaufwand für die Bearbeitung der Prozedur (T_A) kennen, um die Zuverlässigkeit der Diagnose quantifizieren zu können. Auch präsentiert die Publikation Zeit- und Zuverlässigkeitsdaten für zwölf Kategorien, von denen jede eine Gruppe von Diagnosen repräsentiert, bei denen die zu erkennende Situation und die auszuwählende Prozedur vergleichbar sind (vgl. [WES 87], S. 23, Tabelle 3.2.3-1). Beispiele für diese Kategorien sind u. a. die Nutzung von Niederdrucksystemen, falls Hochdrucksysteme nicht verfügbar sind, oder der Betrieb eines Systems von Hand, wenn die entsprechende Automatik versagt (siehe [WES 87], S. 23). Der Anwender hat zu prüfen, welcher Kategorie sein Anwendungsfall entspricht. Die Publikation unterstützt auch die Quantifizierung der zugehörigen Unsicherheitsbänder.

Beide Bewertungsansätze sind nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Das liegt zum einen daran, dass Swain drei Kurven bereitstellt, die von den Rahmenbedingungen des Diagnostizierens wie z. B. dem Ausmaß an Vertrautheit mit der zu diagnostizierenden Situation abhängen. Weston et al. [WES 87] stellen dagegen zwölf Kurven zur Verfügung, unter denen je nach Art der zu erkennenden Situation und der zu nutzenden Prozedur zu wählen ist, wobei diese diagnostischen Leistungen Teil des regelbasierten Fachwissens sind. Zum anderen besteht ein gewichtiger Unterschied, was die Interpretation der Zeit-Zuverlässigkeitskurven betrifft: Bei Weston et al. [WES 87] erfassen sie die unbedingte Wahrscheinlichkeit einer korrekten Diagnose bis zum Zeitpunkt T ab Ereignisbeginn. Swains Kurven hingegen repräsentieren eine durch T_A und T_{MAX} bedingte Wahrscheinlichkeit, dass spätestens nach $T = T_{MAX} - T_A$ die richtige Diagnose vorliegt, dass also der Zeitrahmen für die richtige Diagnose mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ausreicht.

Die Untersuchungen in /PES 18/ haben zu einem ersten Auswahlkriterium zwischen den beiden Ansätzen geführt, welches auch in die Methodenweiterentwicklung hier eingeht:

- Wenn es möglich ist, vor Beginn der Simulation die Zeiten T_{MAX} und T_A einschließlich ihrer aleatorischen Unsicherheiten in objektivierbarer Weise zu ermitteln, stehen beide Ansätze zur Auswahl. Die Entscheidung für oder gegen einen der Ansätze kann auf weiteren Gesichtspunkten beruhen. Beispielhaft sei zum einen derjenige genannt, dass die Bewertung ausschließlich mit dem Ansatz nach Swain erfolgen und nicht auf einer Kombination unterschiedlicher Bewertungsansätze („Methodenmix“) mit zum Teil unterschiedlichen Grundlagen und Herangehensweisen beruhen soll. Bei gegebener Wahlmöglichkeit könnte dagegen der Ansatz nach Weston et al. /WES 87/ beispielsweise dann bevorzugt werden, wenn der Anwender den Ereignisablauf und die Ereignisbäume streng kausal ohne Vorgriff auf Informationen aufbauen möchte, für welche Folgendes gilt:
 - Sie liegen im anstehenden Rechenlauf erst nach Abschluss dieses Rechenlaufes vor oder
 - sie erfordern einen sonstigen Vorgriff auf Simulationsergebnisse, die aus dem Simulationslauf allein nicht zu dem Zeitpunkt vorliegen können, zu dem sie gebraucht werden, weil sie Ergebnis eines späteren Simulationsschrittes sind.
- Der Bewertungsansatz nach Weston et al. /WES 87/ ist dagegen zu nutzen, wenn tragfähige Vorinformationen über T_{MAX} und T_A wegen der Komplexität des Ereignisablaufs nicht oder nur mit erheblichem Aufwand bereitgestellt werden können, und sich keine Alternative zum Ansatz von Weston et al. bietet.

Aus den vorgestellten Überlegungen ergibt sich für die vorliegende Methodenweiterentwicklung als Fazit, dass die Verbindung zwischen MCDET/Crew-Methodik und dem Ansatz für die Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit entsprechend THERP oder ASEP unter bestimmten Bedingungen möglich ist. Diese bestehen darin, Zeitfenster für den erfolgreichen Abschluss der Prozedur, Ausführungszeit für die Prozedur und zufällige Schwankungen beider Zeitwerte vor der Simulation zu bestimmen und in diese einspeisen zu können. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, liegt mit dem Ansatz von Weston et al. /WES 87/ eine gangbare Alternative vor.

4.1.2.2 Anwendung des „Annunciator Response Models“

Abschließend ist noch darauf hinzuweisen, dass die Erkennung der Lage und die Wahl des Vorgehens nicht in allen Fällen den Rückgriff auf ein Modell für die Zuverlässigkeitsbewertung der Diagnose erfordern: Hat das Personal gelernt, auf einen bestimmten Alarm mit einer vorgesehenen Aktion zu reagieren, entfallen aufwendigere diagnostische Aktivitäten, die Lage korrekt zu erkennen und die erforderliche(n) Prozedur(en) auszuwählen. Unter Alarm ist dabei jede auffällig signalisierende Anzeige eines Zustands gemeint, der eine bestimmte Reaktion erfordert. Swain stellt für diese eingeübte Kette aus Alarm – Aktion das sogenannte „Annunciator Response Model“ zur Verfügung (vgl. /SWA 83/, S. 11 – 37 ff.). Dieses Modell unterstützt die Bewertung, dass auf den Alarm (z. B. auf einen Feueralarm) zufallsbedingt keine Reaktion erfolgt, der Alarm also keine Beachtung findet. Die betreffende Wahrscheinlichkeit hängt nicht von der Zeit ab, erfordert also keine Nutzung von Zeit-Zuverlässigkeits-Kurven wie im Fall der Diagnostizitätigkeit. Das „Annunciator Response Model“ wird ein wichtiger Teil der weiterentwickelten Methodik sein.

4.1.3 Stress

Zum Faktor Stress hat Swain einen Bewertungsansatz entwickelt, der im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben RS1198 des BMWi mit den folgenden Ergebnissen kritisch gewürdigt worden ist /FAS 14/:

- „Stress“ ist für Swain die physische oder psychische Anspannung beim Handeln. Letztere reicht „von minimaler Wachheit bis zu einem Gefühl der Bedrohung“ und sie geht, da sie nach Swain „Handeln erfordert“, in die Steuerung des Handelns ein, das als Reaktion auf diese Anspannung erfolgt (siehe /SWA 83/, Seiten 3-33, 17-1, J-28). Auch in der aktuellen Forschung wird Stress nach wie vor als eine psychische und physische Reaktion des Menschen verstanden. Man spricht von Stress aber nur noch in Situationen, die negative Emotionen auslösen, weil sie für den Betroffenen stark beanspruchend oder bedrohlich sind. Bedrohung kann neben Gefahr für Leib und Leben alles sein, was sich gegen das persönliche Wohl richtet und insbesondere auch die Selbstachtung, das Ansehen bei anderen oder die berufliche Existenz schädigen oder zerstören könnte (siehe /SWA 83/, S. 17-9). Geringe Anspannung führt zu Unterforderung mit Folge wie z. B. Langeweile oder Monotonie (vgl. /LAZ 06/, S. 57 ff.). Man beachte, dass auch reizarme Situationen große Anspannung hervorrufen können, wenn der Betroffene gegen ein Nachlassen seiner

Aufmerksamkeit oder Wachheit ankämpfen muss, um z. B. einer persönlich relevanten Bedrohung zu entgehen. Das kann etwa ein Wachposten im Angesicht einer einförmigen Situation gelten, aus der ihm und (oder) anderen schwerwiegende Nachteile erwachsen können, wenn er z. B. eindöst. Die neuere Forschung stellt auch nicht mehr die Anforderung zum Handeln, sondern die Mobilisierung der für das Handeln erforderlichen Ressourcen auf Seiten der Person (z. B. Fähigkeiten, Fertigkeiten, Wissen oder auch Mitmenschen) und damit die Anpassung der Person an die Stresssituation in den Vordergrund (/LAZ 06/, S. 193 ff.).

- Ursache für Anspannung bzw. Stress ist nach Swain das Gleichgewicht bzw. Ungleichgewicht, das zwischen externen und internen Faktoren besteht, von denen Handeln, Leistung und Zuverlässigkeit abhängen (vgl. /SWA 83/, S. 3-6 ff.). Externe Faktoren gehören zur Umwelt des Handelnden und umfassen u. a. den Auftrag zu bestimmten Handlungen sowie Merkmale der Aufgabe, der Mittel und der Handlungssituation wie z. B. Terminvorgaben, Auslegung der Benutzungsoberflächen und Lärm. Interne Faktoren kennzeichnen die Person des Handelnden in physischer und psychischer Hinsicht, umfassen also insbesondere Wissen, Können und Einstellungen des Handelnden. An dieser Sichtweise hat sich in der neueren Fachliteratur nichts geändert (z. B. /LAZ 06/, S. 59).
- Auslöser für Stress heißen bei Swain, wie in der Fachliteratur üblich (z. B. /APA 07/, S. 898), Stressoren. Nach dieser sehr weit gefassten Bestimmung kommt es auf die Reaktion des Betroffenen an, ob und inwieweit eine Anforderung ein Stressor ist. Diese Bestimmung ist nicht zirkulär, weil es auch Anforderungen gibt, die keinen Stress auslösen (wenn es der Person z. B. egal ist, ob sie eine Anforderung zu einer sportlichen Leistung meistert oder nicht).
- Stress gewinnt seine besondere Bedeutung für Sicherheit und Zuverlässigkeit des Handelns wegen seiner Folgen für die Leistung, also die nach bestimmten Kriterien (Soll-Vorgaben) beurteilbaren Ausführungsweisen und Ergebnisse des Handelns. Man kann ein Höchstmaß an Leistung erwarten, wenn ein Gleichgewicht externer und interner leistungsbestimmender Faktoren besteht. Dagegen nimmt die Leistung umso mehr ab, je größer das Ungleichgewicht zwischen diesen Faktoren ausfällt oder, anders gesagt, je mehr die Anspannung entweder abnimmt oder ansteigt. Insgesamt liegt also eine umgekehrt U-förmige Beziehung zwischen Stressausprägung und Leistung vor (siehe /SWA 83/, S. 3-35). Der umgekehrt U-förmige Zusammenhang zwischen Stress und Leistung wird heute kontrovers diskutiert (vgl. /FAS 14/, Abschnitt 3.2.2). Zudem hat die Eingrenzung des Begriffs „Stress“ auf Überforderun-

gen, in denen die Situation der Person mehr abverlangt als sie entweder prinzipiell oder bis zur Mobilisierung erforderlicher Ressourcen leisten kann, die Folge, dass Leistungsminderungen durch eine zu geringe Anspannung nicht auf Stress, sondern auf andere psychische Prozesse zurückgehen.

- Zu stressbedingten Leistungsänderungen gibt es Erkenntnisse aus Laboruntersuchungen und aus dem Arbeitsleben (siehe /FAS 14/, Abschnitt 3.2). Die folgende Liste führt die wichtigsten Effekte auf, die im Arbeitsleben beobachtet worden sind und mit Laboruntersuchungen in Einklang stehen:
 - Unter Stress organisieren die Betroffenen die Bearbeitung anstehender Aufgaben wie folgt: Piloten stellen Aufgaben, die aus ihrer Sicht nachgeordnete Bedeutung haben, hinten. Sie konzentrieren sich auf die Informationen, denen sie eine Schlüsselrolle in der Aufgabe zuweisen, die für sie im Vordergrund steht. Dementsprechend verzichten sie in solchen Situationen mehr und mehr auf die Nutzung der anderen Informationen mit Bezug zu dieser Hauptaufgabe oder zu weiteren Aufgaben. Bei steigender Arbeitslast schränken Fluglotsen ihre Kommunikation mit Piloten zunehmend auf das Minimum ein, das für die Sicherheit unabdingbar ist (vgl. /STA 14/, S. 27-28). Unter Manöverbedingungen reagieren Soldaten auf Stress und Erschöpfung mit der Priorisierung bestimmter Aufgaben und einer entsprechenden Konzentration ihrer Ressourcen auf diese Aufgaben /HAR 05/, S. 127). Solche Anpassungsstrategien unterstützen die Aufgabenerfüllung trotz steigender Anforderungen. Sie können leistungssteigernd wirken, weil man sich auf das Wesentliche konzentriert. Sie schließen aber auch Risiken und Fehlermöglichkeiten durch Auslassung bestimmter, als nachrangig erachteter Arbeitsschritte oder Verzögerungen hintangestellter Aufgaben ein (siehe /STO 94/, S. 72). Denn die subjektive Wertung muss nicht zwangsläufig der objektiven Bedeutung einer Aufgabe oder Information entsprechen.
 - Ängstlichkeit trägt zur Einengung der Aufmerksamkeit auf die bedrohlichen bzw. gefährlichen Aspekte der Situation bei (siehe dazu /STO 94/, S. 77, /KAV 05/, S. 18 und /STA 14/, S. 31). Einige Untersuchungen zeigen auch, dass Ängstlichkeit das Arbeitsgedächtnis, also die temporäre Speicherung aufgabenbezogener Informationen und die Verarbeitung dieser Informationen, beeinträchtigen kann (vgl. /STA 14/, S. 20).
 - Erfahrung, Training und Vertrautheit fördern die effektive Verarbeitung aufgabenbezogener Informationen und ein gutes Entscheidungsverhalten. Das belegen

vor allem Untersuchungen an Piloten (siehe dazu /STA 04/, S. 61 und /STA 14/, S. 36 ff.). Entscheidungen bilden auch eine Grundlage für Prioritätensetzungen.

- Panik kann die Ausführung trainierter und damit regelbasierter Verhaltensweisen verunmöglichen (vgl. /STA 14/, S. 42). Training wirkt also Stress entgegen, dieser Effekt kann aber versagen, wenn die Person in Panik geraten sollte.
- Die Zuverlässigkeit manueller Tätigkeiten erfährt unter Stress und besonders in Gefahrensituationen Beeinträchtigungen, denen Training und Erfahrung entgegenwirken können (/STA 04/, S. 66, /STO 94/, S. 55ff.).
- Personen ordnen sich eher unter (/KAV 05/, S. 19 ff.). Es werden Rechtfertigungen auch für suboptimale Entscheidungen gesucht, zudem wird weniger auf Information geachtet, die aus dem Rahmen des Gewohnten fällt und Kontroversen hervorrufen könnte (siehe /KAV 05/, S. 19 ff.). Man wird für Informationen anderer Gruppenmitglieder empfänglicher (siehe /DRI 91/, S. 475 ff.). Es kann aber auch das gemeinsame Verständnis der Situation und der Gründe verlorengehen, die dem Handeln der anderen Personen in der Gruppe zugrunde liegen (vgl. /STA 04/, S. 75 ff.). Bringt man diese Effekte auf einen gemeinsamen Nenner, kann man sagen, dass die wechselseitige Kontrolle und das kritische Denken im Team mehr oder minder große Einbußen erleiden oder sogar zum Erliegen kommen können.

Eine Besonderheit der Stressbewertung nach Ansatz von Swain besteht darin, dass man mit der nachfolgend aufgeführten Einschränkung prinzipiell erfassen und darstellen kann, ob und wie sich der Stress einer Person während des Handlungsablaufs, also im zeitlichen Verlauf der Handlung, verändert. Da man diese Untersuchung für jede betroffene Person anstellen kann, lässt sich auch ersehen, wie weit die Betroffenen zu verschiedenen Zeiten im Handlungsablauf gleich oder unterschiedlich stark gestresst sind. Diese Untersuchungsmöglichkeit besteht für alle Handlungen, bei denen die Zuverlässigkeit explizit in Abhängigkeit vom Stressniveau zu bewerten ist (siehe /SWA 83/, Tabelle 17-1). Ausnahme bilden die Diagnose, die erstens eine kollektive Aktivität (z. B. der Schichtmannschaft in der Warte) darstellt, und die zweitens in Abhängigkeit von Modellen zu bewerten ist, in die der Faktor „Stress“ implizit, aber nicht mit einem eigens ausgewiesenen quantitativen Beitrag eingeht (vgl. /SWA 83/, Kapitel 12). Swain weist ausdrücklich darauf hin, dass sein Ansatz für die Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit „höchst spekulativ“ und als Nominalmodell für Anpassungen auf der Basis einer syste-

matisch angelegten Expertenbeurteilung offen ist (siehe /SWA 83/, S. 12-22). Diese Expertenbeurteilung könnte im Prinzip auch den Faktor Stress explizit einbeziehen.

Mit Blick auf die Zielsetzung dieser Arbeiten ergibt sich als erstes Fazit, dass die Stressdynamik im Prinzip mit Swains Ansatz modellierbar ist. Die Weiterentwicklungen der Methodik beziehen sich deshalb auf die beiden Aspekte, die Stressdynamik genauer darzustellen und einen Ansatz für die Bewertung der Handlungszuverlässigkeit unter Stress vorzulegen.

4.1.3.1 Erkenntnisse zur Stressdynamik

Zur Präzisierung der Stressdynamik nutzt die vorliegende Methodenentwicklung eine Zusammenfassung wesentlicher Erkenntnisse aus /FAS 14/ (Abschnitt 3.1, insbesondere S. 41 ff., weitere Details und Referenzen siehe dort).

- Stressgenese und Stressveränderung hängen ganz allgemein von den folgenden Faktoren bzw. Prozessen ab, die alle in der Person des Handelnden liegen bzw. ablaufen, also psychologischer Natur sind:
 - Verstehen einer eingetretenen Situation und ihrer Anforderungen an das Handeln.
 - persönliche Bedeutung einer erfolgreichen oder misslingenden Auseinandersetzung mit den Anforderungen für den Handelnden (z. B. Gefahr für Leib und Leben, Gesichtsverlust).
 - Wissen um die beim Eintritt der Situation laufende eigene Tätigkeit, mit ihren Zielen, Gründen, bisherigen Schritten und Ergebnissen, Teilerfolgen oder Fehlschlägen und damit Erfolgsaussichten bzw. zu überwindenden Schwierigkeiten und den Anstrengungen, die mit der Tätigkeit einhergehen bzw. zu erwarten sind.
 - Wissen um die eigenen Handlungs- und Leistungsmöglichkeiten im Allgemeinen (z. B. aus früheren Erfahrungen mit der Situation, Training).
 - Urteil, ob die eigene Anstrengung bei der laufenden Tätigkeit ausreicht, um die Anforderungen der Situation zu meistern oder ob es dafür zusätzlicher Anstrengungen und (oder) einer anderen Vorgehensweise bedarf.

- Der weiter oben eingeführte Begriff der Diagnose erfasst explizit die beiden Faktoren, die Situation oder Lage zu erkennen bzw. zu verstehen und die Entscheidung für die erforderliche Handlungsoption (Prozedur), die dem Handelnden geläufig ist. Damit gehören zu diesem Begriff der Diagnose auch die fachkundlichen Kenntnisse, die der Handelnde mehr oder minder schnell und fehlerfrei präsent hat.
- In den Diagnoseansatz geht zudem die Voraussetzung ein, dass sich die Betroffenen der Situation und ihren Anforderungen stellen (also z. B. nicht vor der Gefahr davonlaufen).
- Stress ist die kognitive und emotionale Reaktion der Person auf den erlebten Zustand, dass sie mit ihrem aktuellen Vorgehen und ihrer aktuellen Anstrengung den Anforderungen, wie sie sich aus ihrer Sicht darstellen, nicht gewachsen sein wird, dass sie sich und ihr Handeln also an die Situation und die Anforderungen anpassen muss, die zu meistern sind. Stress vergeht, wenn sich der Handelnde fähig sieht (und bereit ist), sein Vorgehen bzw. seine Anstrengungen an die Erfordernisse so anzupassen, dass er ihnen gewachsen ist und sie erfüllen wird.
- Entscheidend ist, dass sich diese Beurteilung auf die aktuell in ein bestimmtes Vorgehen „investierte“ Anstrengung und den „Spielraum“ bezieht, den der Handelnde aufgrund seines Wissens und seiner Erfahrung für Leistungssteigerungen und bessere Anpassungen seines Handelns an die Anforderungen der Situation sieht.
- Mit der Beurteilung geht auch eine emotionale Reaktion einher: ein negativer Affekt besteht oder wächst, solange die Person befürchtet, der Lage nicht gewachsen zu sein. Dieser negative Affekt erfährt eine Reduktion oder kehrt sich sogar ins Positive um, wenn der Handelnde glaubt, die Lage meistern zu können, und wenn sein entsprechendes Vorgehen zu realen Erfolgen führt. Der Mensch kann sogar Strategien der Selbstberuhigung und Selbstmotivierung anwenden, um negativen Gefühlen entgegenzuwirken („erst mal tief Luft holen“, „das schaffe ich, mit solchen Situationen bin ich immer klargekommen“, „ich weiß doch, was zu tun ist“, usw.). Im Extremfall kann es aber auch zu Handlungsblockaden kommen, wenn die Person nur noch mit ihren negativen Gefühlen beschäftigt ist, wenn sie also nur noch darüber nachgrübelt, was ihrem Handeln in der Situation alles entgegensteht, oder mit dem bösen Schicksal hadert, in diese Situation geraten zu sein (statt sich mit der aktuellen Lage vorerst abzufinden und Auswege aus der Situation zu suchen).

- Stress ist also eine sehr dynamische Reaktion, die von momentanen Beurteilungen der eigenen Anpassungsfähigkeit an Anforderungen, Affekten und Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Faktoren abhängt und, je nach dem gegebenen kognitiv-affektiven Zustand des Handelnden, zwischen den Extremen einer Handlungslähmung und eines Niveaus ohne leistungsrelevante Auswirkungen hin und her schwanken kann. Die Stressdynamik kann im Extrem der Handlungslähmung oder einer Dämpfung auf ein leistungsirrelevantes Niveau verbleiben, wenn der Handelnde keinen Weg zur aktiven Veränderung der Situation findet bzw. wenn die Fortschritte bei der Beherrschung der Anforderungen dem Handelnden zeigen, dass er sich mit seiner Vorgehensweise und seiner Anstrengung auf dem richtigen Weg befindet. Auch kann die Stressdynamik dadurch Veränderungen erfahren, dass die Betroffenen z. B. ermüden, also nicht mehr über ihre vollen Fähigkeiten verfügen oder aber infolge geeigneter organisatorischer Vorkehrungen zu einem bestimmten Zeitpunkt durch frische Kräfte abgelöst werden.
- Bei den durchgeführten Untersuchungen geht es um Ereignisse mit unter Umständen gravierenden Folgen für den Handelnden, Andere, Umwelt und (oder) Anlage. Man erlebt oder erwartet also Bedrohungen, Risiken, Verluste oder Schädigungen, die negative Gefühle wie Nervosität, Unruhe, Sorge, Befürchtungen, Ängste usw. auslösen.
- Es kostet Anstrengung und Zeit, solche Gefühle ggf. immer wieder zumindest zeitweise soweit zu meistern, dass man sich der Tätigkeit und ihrer Bearbeitung (wieder) zuwenden kann. Stress und seine Bewältigung können also im Zeitaufwand für die Erfüllung der Aufgabe auch erheblich zu Buche schlagen. Aufmerksamkeit und Bewusstsein werden entsprechend von der Steuerung der anstehenden Tätigkeit abgezogen. Routiniertes Handeln erfordert im Vergleich zu nicht-routiniertem Handeln ein geringeres Ausmaß an bewusster Aufmerksamkeit, entlastet den Ausführenden also in einem gewissen Umfang von einer bewussten Kontrolle seines Handelns. Stress kann sich dennoch leistungsmindernd auswirken, wenn er die bei routiniertem Handeln erforderliche bewusste Kontrolle beeinträchtigt, weil die Aufmerksamkeit z. B. durch immer wieder sich aufdrängende negative Gefühl gebunden wird. Routine kann aber auch dazu beitragen, Stress so weit zu dämpfen, dass man leistungsmindernde Effekte vernachlässigen darf: Die angesprochenen negativen Gefühle treten entweder gar nicht oder deutlich weniger ausgeprägt auf, wenn sich der Handelnde mit dem Gedanken beruhigen kann, dass er die gelernt hat, wie er die anstehende Situ-

ation meistern kann, und die erforderliche Routine erworben hat, die ein zuverlässiges Handeln in der Situation wesentlich unterstützt.

- Die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf Information, die der Handelnde als wichtig erachtet, kann die Zuverlässigkeit fördern, wenn es sich um die sicherheitstechnisch relevanten Informationen aus Anzeigen, Kommunikationen oder Dokumenten handelt. Es besteht aber auch das Risiko, die Aufmerksamkeit zu sehr einzuengen und objektiv Wichtiges zu übersehen. Man denke etwa an die starke Konzentration der Aufmerksamkeit auf Gefahrenquellen, deren Überzeichnung und eine daraus resultierende, mehr oder minder große „Blindheit“ für die Auswege aus der Gefahr.
- Das Arbeitsgedächtnis erfüllt als Instanz für die Verarbeitung und temporäre Speicherung von Informationen eine Schlüsselrolle. Seine stressbedingte Beeinträchtigung kann zu Auslassungen, aber auch Verwechslungen führen oder beitragen. Denkbar sind z. B. das Vergessen einer mündlichen Anweisung oder die Erinnerung an einen veralteten, aber jahrelang gültigen Grenzwert, den der Handelnde anstelle des geänderten Wertes seinem weiteren Vorgehen als Referenz unterlegt. Untersuchungen belegen den Effekt, dass man sich an gut Gelerntes unter Stress zügig erinnert. Hat Letzteres nach wie vor seine Gültigkeit, muss man folglich keine Einbußen des Arbeitsgedächtnisses in Bezug auf die zugehörigen Erinnerungsleistungen unterstellen.
- Die Feinmotorik kann unter Stress ungenauer werden (s. o.) und bei Eingriffen zu Verwechslungsfehlern wie z. B. die zu weite oder zu geringe Öffnung eines Ventils oder die Fehlbetätigung eines Schalters anstelle des eigentlich zu nutzenden, benachbarten Schalters führen oder beitragen.
- Man muss auch damit rechnen, dass die wechselseitige Kontrolle und das kritische Denken im Team mehr oder minder große Einbußen erleiden oder sogar zum Erliegen kommen. Ordnen sich beispielsweise die Mitglieder einer gestressten Schichtmannschaft entsprechend „unkritisch“ der Autorität des Schichtleiters unter, entfällt ein wesentliches Korrektiv für dessen fehlerhafte Anweisungen.
- Ungenauigkeiten und damit Fehlerquellen können auch darauf zurückgehen, dass man danach strebt, die Situation möglichst bald zu meistern, also Schnelligkeit einen Vorrang vor Genauigkeit erhält.

Stress entsteht und verändert sich also in Abhängigkeit vom Ausmaß, in dem die Anforderungen einer Bewältigung der Situation die Möglichkeiten („Ressourcen“) auf Seiten des Handelnden zumindest momentan übersteigen. Diese Ressourcen reichen von den eigenen Fähigkeiten bis hin zu Optionen, Unterstützung bei anderen Personen zu finden. Man kann einwenden, dass eine Situation, in der die Anforderungen an den Handelnden dessen Ressourcen dauerhaft übersteigen, keine Aussicht auf erfolgversprechendes Handeln bietet und das Handeln folglich zum Erliegen kommen müsste. Diese Möglichkeit besteht, sie wurde oben als Lähmung des Handelns durch übermächtige Affekte beschrieben und wird in die Quantifizierung der Handlungszuverlässigkeit eingehen. Man kann den Einwand aber durch weitere Überlegungen relativieren:

- Eine Situation kann zwar Merkmale aufweisen, die der Handelnde nicht ändern kann, in der er aber trotzdem tätig werden muss bzw. müsste. Man denke etwa an ein Flugzeug, dessen auf Reiseflughöhe ausgefallene Triebwerke die Piloten nicht wieder in Gang setzen können. Sie stehen also vor der Anforderung einer Not- oder sogar Bruchlandung. Die zugehörigen Aktionen stellen eine stressauslösende Bedrohung mit entsprechenden Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Handelns dar.
- Training und (oder) Erfahrung können dem Handelnden ein Wissen und eine Routine vermittelt haben, die ihnen das Gefühl gibt, der Versuch lohne, die Situation meistern zu wollen, auch wenn sie ihre Erfolgsaussichten für bescheiden halten. Man vergleiche dazu die Evidenz zur stressmindernden Wirkung der Schulung und Übung.
- Die Ausbildung kann zudem zu einem Arbeits- und Berufsethos geführt oder beigetragen haben, die dazu motiviert, das Mögliche zu tun, um Gefahren oder Risiken abzuwenden oder abzumildern.

Somit bedarf Stress mit seiner Dynamik aufgrund der Wechselwirkungen zwischen bedrohlichen Anforderungen, Affekten, eigenen Ressourcen, Anpassungsmöglichkeiten und Grenzen der Auseinandersetzung mit der Situation einer differenzierten Betrachtung, um Auswirkungen auf Handeln, Leistung und Zuverlässigkeit zutreffend beurteilen zu können.

4.1.3.2 Quantifizierung der Zuverlässigkeit des Handelns unter Stress

Die Ausführungen gehen zunächst auf die diagnostischen Aktivitäten ein. Danach wird die Zuverlässigkeit der Ausführung sonstiger Handlungen betrachtet. Der Zielsetzung des Vorhabens entsprechend geht es um regelbasiertes Diagnostizieren und Handeln.

Für die Quantifizierung der Diagnosezuverlässigkeit sieht die vorliegende Methodik zwei Ansätze vor (s. o.). In beiden ist der Faktor „Stress“ genauer als bisher einzubeziehen. Beide Ansätze sehen Zeit-Zuverlässigkeits-Kurven mit Unsicherheitsbändern vor und berücksichtigen Aufgaben mit bestimmten Rahmenbedingungen. Man darf davon ausgehen, dass diese Rahmenbedingungen implizit auch das „normale“ Ausmaß an Stress erfassen, dem die Ausführung der Aufgabe unter diesen Bedingungen unterliegt.

- Darf der Methodenanwender aufgrund der vorliegenden Informationen aus Anlagenbegehungen und (oder) Beobachtungen des Personals begründet annehmen, dass die Rahmenbedingungen bestehen, für die der Bewertungsansatz entwickelt worden ist, ist das ursprüngliche Bewertungsmodell in unveränderter Form zu nutzen. Dieser Fall liegt dann vor, wenn die Personen zielsicher sowohl die diagnostisch relevanten Informationen suchen, aufnehmen und verarbeiten als auch die erforderliche(n) Prozedur(en) identifizieren.
- Zeigt sich anhand der Beobachtungen aus den genannten Quellen ein größerer Aufwand für die Diagnose, verlängert der Methodenanwender die Zeitspanne ab Ereignisbeginn, in der die korrekte Diagnose sicher nicht erfolgt.
- Der Bewertungsansatz von Swain bietet die Möglichkeiten, das Nominalmodell für die Diagnosezuverlässigkeit durch das konservativere Modell der Grobbewertung zu ersetzen oder das Nominalmodell mit einem geeigneten Zeitzuschlag zu versehen. Beide Möglichkeiten führen dazu, dass die Wahrscheinlichkeit der richtigen Diagnose zum Ende des maximal zur Verfügung stehenden Zeitfensters abnimmt.
- Um eine ähnliche Zeitspanne kann der Methodenanwender auch Zeit-Zuverlässigkeits-Kurven bei Weston et al. /WES 87/ verschieben. Eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für die korrekte Diagnose verschiebt sich somit in den Bereich höherer Zeiten ab Ereignisbeginn.
- Der Methodenanwender nutze diese Optionen, wenn die Beobachtungen belegen, dass das Personal in der Diagnosephase nicht nur mit der Lageerkennung

der Prozedurauswahl, sondern auch erheblich mit der Bewältigung stressbedingter Affekte und Stockungen oder sonstiger Beeinträchtigungen geordneter kognitiver diagnostischer Aktivitäten beschäftigt ist und entsprechend Zeit verliert.

- Im Extremfall kann der Methodenanwender zu dem Schluss kommen, dass die Diagnose misslingen wird, d. h. der Zustand einer nicht erfolgten korrekten Diagnose nie verlassen wird.

- Ergeben sich aus den Beobachtungen Hinweise auf Unterschiede zwischen den Leistungen der diagnostizierenden Teams (bzw. Einzelpersonen), die den Rahmen der Unsicherheitsbänder in den Bewertungsansätzen für die Diagnosezuverlässigkeit nach Swain bzw. Weston et al. /WES 87/ sprengen, erhöhe der Methodenanwender die Breite dieser Unsicherheitsbänder. Als erste Orientierungshilfe stehen die Eintragungen in Tabelle 7-2 von THERP (in /SWA 83/, S. 7-13) mit ihren jeweiligen fachwissenschaftlichen Begründungen zur Verfügung. Breitere als die aufgeführten Unsicherheitsbänder können nach Expertenurteil und mit Dokumentation der zugehörigen Überlegungen festgesetzt werden.

Auf die Diagnose und damit die Entscheidung für die erforderliche(n) Prozedur(en) folgt die Ausführung letzterer. Es wird also der Fehler ausgeschlossen, dass die Entscheidung für eine Prozedur fällt und ihre Ausführung unterbleibt. Wie weiter oben dargelegt, dienen THERP und ASEP als Methoden für die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit in deutschen Kernkraftwerken. Anders als die Diagnose unterliegt die Anwendung des Zahlenwerks für Unterlassungs- und Ausführungsfehler in der dynamischen MCDET-basierten probabilistischen Sicherheitsanalyse keinen Einschränkungen. Auch wird bis zur Bereitstellung umfassender empirischer Erkenntnisse zur Leistungsminderung durch Stress der Bewertungsansatz beibehalten, eine Gewichtung der nominalen Basisfehlerwahrscheinlichkeiten entsprechend Tabelle 17-1 in /SWA 83/, S. 17-4 vorzunehmen. Der Eintrag für zu geringe Anspannungen wird dabei nicht berücksichtigt, weil dieser Fall nicht mehr unter Stress- fällt (s. o. zum Stressbegriff). Der Anwender beachte, dass Stress auch bei erhöhter Anspannung ohne Leistungseinbußen einhergehen kann, weil und wenn sich das gestresste Personal auf die sicherheitstechnisch wichtige Information konzentriert.

Eine statistisch fundierte Auswertung meldepflichtiger Ereignisse hat Erkenntnisse zur Höhe des Beitrags erbracht, den verschiedene Ausprägungen des Faktors Stress zur Handlungszuverlässigkeit leisten. Diese Erkenntnisse beziehen sich stets auf bestimmte, einzelne Handlungen, können also über diese Handlungen hinaus nicht ohne

Weiteres generalisiert werden. Für manche der einschlägigen Handlungen hat sich gezeigt, dass sie in Einklang mit dem Stressmodell aus THERP stehen, für andere dagegen nicht (vgl. /PRE 16/, S. 53 bzw. 55). Generalisierbarkeitsproblematik und heterogene Evidenz waren die Gründe dafür, dieses Datenmaterial vorerst nicht in der vorliegenden Methodik zu nutzen.

Die stochastischen Verteilungen für die Ausführungszeiten erfahren in der vorliegenden Methodik keine stressabhängigen Veränderungen, weil dafür ausreichende Evidenz fehlt (siehe /FAS 14/, Abschnitt 3.2). Ein evtl. stressbedingter Mehrbedarf an Zeit für die Ausführung einer Prozedur werde durch Berücksichtigung entsprechender Pausen berücksichtigt, in denen das Personal mit Stressbekämpfung und nicht mit der Ausführung der prozedurspezifischen Handlungen beschäftigt ist.

4.1.4 Weitere leistungsbestimmende Faktoren

Stress ist einer unter mehreren Faktoren, die sich auf die Zuverlässigkeit des Handelns auswirken. Man unterscheidet darüber hinaus in den verschiedenen Analyse- und Bewertungsmethoden zumindest

- die Qualifikation der Ausführenden,
 - die Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstellen in ergonomischer Hinsicht sowie
 - die Schriftlichkeit der Prozeduren und Gestaltungsfaktoren schriftlich niedergelegter Prozeduren.
- Zu einer Prozedur muss es nicht unbedingt ein papierenes oder elektronisches Dokument geben, das den Handelnden zur Verfügung steht. In solchen, dokumentlosen Fällen sind Gedächtnis und Erinnerung der Wissens- und Erfahrungsträger das Medium, in dem die Prozedur im Gefolge eines Vermittlungsprozesses mehr oder minder zuverlässig verfügbar ist.
 - Man kann den Begriff der Prozedur so weit fassen, dass er nicht nur die schriftlichen Anweisungen v. a. des Betriebs- und Notfallhandbuchs, sondern auch sonstige schriftliche Arbeitsmittel wie z. B. Arbeitsaufträge, Arbeitscheine, Freischaltlisten usw. für eine Instandhaltung sowie ad hoc erstellte Notizen einschließt. Die vorliegende Methodik nutzt diesen weit gefassten Begriff. Sie behandelt mündliche Kommunikationen als eine Kategorie des Handelns, die von

Prozeduren, Unterlagen und ad hoc-Notizen zu unterscheiden ist (siehe Abschnitt 4.1.5).

Je nach Methode können weitere leistungsbestimmende Faktoren hinzukommen. Aus den schon genannten Gründen gibt die vorliegende Methodik THERP bzw. ASEP den Vorzug. Der Anwender hat im ausführlicheren Ansatz THERP über Qualifikation, Schnittstellendesign und Ausgestaltung der Vorgaben für das Handeln in Form von Prozeduren, sonstigen Unterlagen und Notizen die folgenden Faktoren zu analysieren und zu beurteilen:

- Die Bearbeitung einer Aufgabe kann eine „schrittweise“ oder eine „dynamische“ Vorgehensweise erfordern.
 - „Schrittweise“ heißt, dass der Ausführende eine Prozedur oder sonstige Anleitung für Aufgaben in der vorgegebenen Reihenfolge routiniert Anweisung für Anweisung abarbeitet.
 - Ein im Sinne von Swain dynamischer Bearbeitungsmodus liegt dagegen vor, wenn der Handelnde gleichzeitig mehrere Aufgaben bearbeiten und ihnen in einem mehr oder minder regelmäßigen, von der Entwicklung des Ereignisablaufs abhängigen und daher nicht im Voraus festlegbaren Wechsel immer wieder seine Aufmerksamkeit zuwenden muss. Man denke an die parallele Überwachung und Regelung mehrerer Prozessparameter (siehe /SWA 83/, S. 17-4), wenn diese Aufgaben nicht so festgeschrieben, eingeübt und praktiziert werden können, dass routiniertes, schrittweises Abarbeiten möglich ist. „Dynamisch“ im Sinne von Swain ist auch das Abwägen verschiedener Entscheidungsalternativen (sofern dafür kein schrittweise abzuarbeitendes Entscheidungsverfahren zum Einsatz kommt).
- Erfolg oder Fehler einer Handlung können sich auf die Zuverlässigkeit der aufgeführten Handlung(en) auswirken. Man spricht auch von der Abhängigkeit zwischen Aufgaben bzw. Handlungen. Sie kann von totaler Unabhängigkeit bis zu völliger Abhängigkeit reichen, wobei sich Swain auf die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Fehlers im Gefolge einer vorhergehenden Unterlassung oder Verwechslung konzentriert (vgl. dazu /SWA 83/, Kap. 10, insb. S. 10-10 ff.), konservativ also den positiven Effekt eines Erfolgs auf die Zuverlässigkeit nachfolgender Handlungen vernachlässigt.

Verschiedene dieser Faktoren können in spezifischere Teil- oder Unterfaktoren aufgeschlüsselt werden (z. B. die Zahl der Anweisungen, aus denen eine Prozedur besteht).

Die vorliegende Methodenentwicklung geht darauf nicht weiter ein, weil sie sich auf die allgemeinere Frage konzentriert, wie der u. U. wechselnde Beitrag leistungsbestimmender Faktoren im Ereignisablauf zur Handlungszuverlässigkeit methodisch zu berücksichtigen ist. Diese Fragestellung lässt sich für die aufgeführten Faktoren beantworten, die Antwort gilt *mutatis mutandis* auch für Teil- oder Unterfaktoren.

THERP bzw. ASEP sehen eine Zerlegung des Handlungsablaufs in Einzelhandlungen vor. Die leistungsbestimmenden Faktoren sind daher im Prinzip für jede betrachtete Handlung separat zu erfassen und auf ihre zuverlässigkeitsförderliche bzw. zuverlässigkeitsmindernde Wirkung zu beurteilen. Diese Zerlegung unterstützt die Modellierung möglicher Unterschiede, die der Beitrag eines leistungsbestimmenden Faktors zu verschiedenen Zeitpunkten des Handlungsablaufs aufweisen kann: Da diese möglichen Unterschiede Handlungen betreffen, die zu verschiedenen Zeitpunkten stattfinden können, sind die zeitlichen Veränderungen des Beitrags leistungsbestimmender Faktoren im Ereignisablauf anhand der Chronologie betroffener Handlungen nachvollziehbar.

Diesen Überlegungen entsprechend gilt für die oben aufgeführten Faktorengruppen, dass ihre zeitlichen Veränderungen im Handlungsablauf wie folgt zu berücksichtigen sind:

- Die Qualifikation unterliegt, da sie Ergebnis einer längerfristigen Entwicklung durch Training und (oder) berufliche Praxis ist, kaum kurzfristigen Änderungen innerhalb des Zeitfensters für einen Ereignisablauf. Trotzdem muss man Faktoren in Rechnung stellen, die dazu führen können, dass die Zuverlässigkeit der verschiedenen Handlungen im Handlungsablauf von Qualifikationen unterschiedlicher Ausprägung abhängt, der Beitrag des Faktors Qualifikation im Ereignisablauf also Änderungen unterliegen kann:
 - Zum einen können im Ereignisablauf Personen durch andere abgelöst werden. Das kann zuverlässigkeitsrelevante Auswirkungen haben, wenn sich ablösende und abgelöste Personen in ihrer Qualifikation unterscheiden, also z. B. unerfahrene gegen erfahrene Mitarbeiter ausgetauscht werden.
 - Zum anderen muss man mit der Möglichkeit rechnen, dass eine Person im Ereignisablauf z. B. wegen Erschöpfung ausfällt und für eine Zeitspanne kritischer Länge kein Ersatz zur Verfügung steht. Die vorliegende Methode berücksichtigt die letztgenannte Möglichkeit, indem sie die Reaktion des „Restteams“ auf den

Ausfall nach den Erkenntnissen modelliert, die dazu aus der Anlagenbegehung und (oder) Beobachtungen z. B. von Übungen vorliegen.

- Die Verfügbarkeit des für den Einsatz erforderlichen Personals hängt auch davon ab, wie lange es dauert, bis die Personen nach Alarmierung an den vorgesehenen Sammelpunkten bzw. Arbeitsorten für den Einsatz bereitstehen. Es sind die beiden Fälle zu unterscheiden, dass benötigtes Personal schon auf dem Gelände der Anlage ist oder erst von außen herangezogen werden muss. Steht das Personal schon auf der Anlage zur Verfügung, gibt es die beiden Unterfälle, dass Mitarbeiter bereits am Arbeitsplatz oder Sammelpunkt bereitstehen oder diesen Ort erst aufsuchen müssen. Man denke z. B. an die Operateure in der Warte, die in einer festgelegten Mindestzahl auf der Warte anwesend zu sein haben. Andere Mitarbeiter der Schichtmannschaft, wie der stellvertretende Schichtleiter oder Schichtelektriker, können sich dagegen z. B. auf Rundgängen durch die Anlage befinden. Solche Personen sind im Bedarfsfall an den Arbeitsplatz oder zum Sammelpunkt zu beordern und stehen dort erst mit einer Verzögerung bereit, die von der Länge des Weges, den Aufwand für das Passieren evtl. Kontrollposten, Türen oder Schleusen (z. B. des Kontrollbereichs) und zufälligen Schwankungen dieser Zeitspannen abhängt. Der Methodenanwender hat Zeitaufwände und ihre zufälligen Schwankungen unter Berücksichtigung der anlagenspezifischen Gegebenheiten zu klären. Außerhalb der regulären Arbeitszeiten muss das dafür zuständige Personal auf der Anlage benötigte Mitarbeiter von ihren Aufenthaltsorten außerhalb der Anlage auf die Anlage beordern. Bei den Zeitaufwänden hat man die einschlägigen Bestimmungen der Alarmordnung, evtl. systematische Verzögerungen durch ungünstige Wetterbedingungen und auch Zufallsschwankungen zu betrachten: Aus der Alarmordnung geht hervor, wieviel Personen mit welchen Qualifikationen bzw. Aufgaben innerhalb vorgegebener Zeitspannen auf der Anlage eintreffen sollten. Besondere Wetterbedingungen können Zuschläge erfordern, wenn z. B. vereiste oder überschwemmte Straßen langsames Fahren oder Umwege erzwingen. Tatsächliche Zeitaufwände können mit den Erfahrungen z. B. aus Alarmübungen oder der Dauer des täglichen Wegs zur Arbeit abgeschätzt werden und evtl. auch Einschätzungen des Beitrags extremer Wetterunbilden unterstützen. Ein Ereignis kann die Zusammenarbeit mit Personen und Einrichtungen erfordern, die nicht zum Eigenpersonal der Anlage gehören. Man denke z. B. an Polizei und Feuerwehren umliegender Orte oder Mitarbeiter des Betreiberunternehmens, die nicht am Standort der Anlage stationiert sind. Der Methodenanwender hat Art und Aufgaben dieser Personen bzw. Einrichtun-

gen, ihre Erreichbarkeit innerhalb und außerhalb regulärer Arbeitszeiten und die Zeitspannen zu klären, nach der sie für den Einsatz bereitstehen. Evtl. sind Wegezeiten zur Anlage bzw. zu einem davon abweichenden Arbeitsplatz einzurechnen, wenn der Einsatzort das Anlagengelände oder eine Lokalität ist, die sich vom Standort unterscheidet, den die Personen zum Zeitpunkt der Kontaktaufnahme für den Einsatz eingenommen haben. Es gilt, wie für das Eigenpersonal, das von Orten außerhalb der Anlage beordert wird, Zeitbedarf für das Erreichen des Einsatzortes, evtl. Mehraufwände z. B. wegen Wetterunbilden und den Beitrag von Zufallseffekten zu klären. Der Methodenanwender sollte beachten, dass im Zuge der Stilllegung und des Rückbaus bestimmte Aufgaben zentralisiert und auf Standorte außerhalb der betrachteten Anlage verlagert worden sein können.

Somit tragen verschiedene Faktoren dazu bei, dass sich der Bestand an Personen mit benötigten Qualifikationen und damit die Beiträge dieser Qualifikationen zu den einzelnen Handlungen im Verlauf des Ereignisses u. U. auch erheblich ändern kann. Aus diesem Blickwinkel kann der Faktor Qualifikation im Ereignisablauf Veränderungen erfahren, die eine dynamische Analyse nicht vernachlässigen darf. Methoden-anwender haben also die Fragen zu klären, wann wie viele Personen mit erforderlichen Qualifikationen für den Einsatz bereitstehen, ob es sich um Erfahrene oder Neulinge handelt und von welchen Zufallsgrößen die Verfügbarkeit dieses Personalbestandes zu einem gegebenen Zeitpunkt abhängt.

- Die Designqualität der Mensch-Maschine-Schnittstellen ist jeweils für den Teil der Benutzungsoberfläche bzw. die Informations- und Bedieneinrichtungen zu erfassen und zu beurteilen, an denen die Beschaffung einer bestimmten Information bzw. mit denen eine betrachtete Schalthandlung oder sonstige Aktion stattfindet.
 - Dieselbe Benutzungsoberfläche könnte z. B. Anzeigen mit und ohne Markierungen sicherheitstechnisch wichtiger Grenzwerte umfassen. Grenzwertmarkierungen erleichtern den Vergleich von Ist- und Sollwerten mit entsprechender Auswirkung auf die Zuverlässigkeit dieses Vergleichs.
 - Wird ein und dieselbe Schnittstelle im Ereignisablauf zu unterschiedlichen Zeitpunkten benötigt, ist die Möglichkeit zu berücksichtigen, dass sie zu einem bestimmten Zeitpunkt ausfällt und zumindest während eines Teils der Zeitspanne ausgefallen bleibt, in der das Personal die zugehörigen Informations- und Bedieneinrichtungen benötigt. Solche Fälle liegen z. B. vor, wenn das Personal Leit-

stände vor Ort wegen Feuers nicht mehr erreichen kann oder diese Leitstände nach Kurzschlüssen ihre Funktionsfähigkeit verloren haben.

- Neben dieser Art von Ausfällen können im Ereignisablauf auch Umgebungsfaktoren Veränderungen erfahren, die sich auf die Nutzbarkeit einer im Prinzip verfügbaren und zugänglichen Schnittstelle auswirken. Man denke z. B. an die mehr oder minder zuverlässige Ablesbarkeit angezeigter Informationen in Abhängigkeit von ausfallenden bzw. (wieder) funktionierenden oder improvisierten Beleuchtungseinrichtungen oder vergleichbarer, für die Sicht wichtiger Rahmenbedingungen wie etwa Qualm in Abhängigkeit von Vorhandensein, Funktionsfähigkeit, Leistung und Betriebsdauer von Rauchabzugseinrichtungen. Man hat, wie beim Ausfall einer Person, solche Möglichkeiten den Erkenntnissen entsprechend zu modellieren, wie sie aus der Anlagenbegehung usw. vorliegen.
- Der Beitrag schriftlicher Unterlagen ist im Prinzip ebenfalls Handlung für Handlung zu erfassen und zu beurteilen. Dies gilt auch dann, wenn ein- und dasselbe Dokument einer ganzen Abfolge von Handlungen zugrunde liegt:
 - Einzelne Teile der Prozedur können unterschiedliches Layout aufweisen. Man denke etwa an eine Prozedur, die den Schichtleiter und die Operateure mit unterschiedlichen Unterlagen unterstützt: Diese könnte für den Schichtleiter z. B. ein Flussdiagramm vorsehen, welches ihm vor Augen stellt, wie die einzelnen Teilaufgaben innerhalb der Prozedur zusammenhängen. Für die Operateure könnte die Prozedur zu jeder dieser Teilaufgaben Listen der detaillierten Anweisungen enthalten, die der Operateur zur Erfüllung der Teilaufgabe Schritt für Schritt auszuführen hat.
 - Für bestimmte Aufgaben kann die Anlage Checklisten oder die Eintragung von Erledigungsvermerken vorsehen, für andere dagegen nicht. Checklisten und Erledigungsvermerke erleichtern, wenn sie bestimmungsgemäß genutzt werden, die visuelle Kontrolle, welche Anweisungen bereits bearbeitet sind und welche noch nicht. Solche Vorkehrungen wirken z. B. Auslassungsfehlern entgegen.
 - Die Nutzung einer Prozedur oder sonstigen Unterlage kann auf der betrachteten Anlage prinzipiell so organisiert sein, dass die Ausführenden einer Aufgabe Entnahmeexemplare erhalten (oder nicht) und der Beauftragende ein Duplikat der ausgehändigten Dokumente behält (oder nicht). Ohne schriftliche Unterlagen mit ausreichend detaillierten Informationen und Anweisungen müssen diese Personen bei der Aufgabendurchführung aus dem Gedächtnis heraus handeln und

(oder) rückfragen. Erinnern und Rückfragen sind fehlerträchtige Aktivitäten, welche entfallen, wenn die Personen über geeignete Unterlagen verfügen.

- Lesbarkeit und damit Zuverlässigkeit der Nutzung schriftlicher Informationen hängen (wie bei den Mensch-Maschine-Schnittstellen) von Umweltfaktoren wie z. B. der Beleuchtung ab. Der Methodenanwender sollte auch die Möglichkeit berücksichtigen, dass Unterlagen z. B. bei Tätigkeiten vor Ort unabsichtlich Verschmutzungen oder andere Beeinträchtigungen der Lesbarkeit oder Nutzbarkeit von Informationen erfahren können. Die Ausführenden könnten zudem auf die Verwendung schriftlicher Unterlagen verzichten, wenn sie dafür am Arbeitsort keine geeignete Ablagemöglichkeit haben oder die Handhabung der Unterlagen z. B. durch dicke Handschuhe erschwert wird. Vorliegen und Veränderungen solcher Faktoren und ihre Wirkung sind ebenso wie die Reaktion der Betroffenen so zu modellieren, wie es den Erkenntnissen aus der Anlagenbegehung usw. entspricht.
- Ein Verzicht auf die Nutzung vorhandener Unterlagen kann darauf zurückgehen, dass sich die Handelnden sicher sind, den Inhalt auswendig zu kennen und aus dem Gedächtnis heraus arbeiten zu können.
- Auch kann die reale von der vorgesehenen Nutzungsweise in fehlerförderlicher Weise abweichen. Denkbar ist beispielsweise die nachträgliche Eintragung der Erledigungsvermerke in Checklisten, die eigentlich so verwendet werden sollten, dass eine Anweisung unmittelbar nach der Ausführung abzuhaken ist.
- Schrittweises oder dynamisches Bearbeiten einer Aufgabe können mit der Vorgehensweise, die das Crew-Modul für die MCDET-basierte Analyse und Bewertung vorsieht, direkt modelliert werden.
- Auch Abhängigkeiten zwischen sukzessiven Fehlern sind Handlung für Handlung zu untersuchen und zu bewerten.

Als Fazit gilt: Prinzipiell bedarf es keiner gesonderten Weiterentwicklungen der Methodik MCDET-basierter dynamischer probabilistischer Sicherheitsanalysen, um leistungsbestimmende Faktoren, die neben dem Stress zuverlässigkeitsrelevant sind, einschließlich ihrer möglichen Veränderungen in die Modellierung des Handlungsablaufs einbeziehen zu können. Das gilt im Prinzip auch für die stochastischen Verteilungen der Zeitaufwände für die Ausführung einzelner Handlungen: In einer nicht dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse hat der Anwender Ausführungszeitpunkte und (oder) Zeitfenster so

festzusetzen, dass sie die stochastischen Verteilungen repräsentieren ohne wesentliche Fehlermöglichkeiten auszuschließen. Dazu hat er die zugehörigen stochastischen Zeitverteilungen entsprechend näher zu bestimmen oder gleich so festzulegen, dass sie direkt auch in eine dynamische probabilistische Sicherheitsanalyse eingehen können.

Der Anwender hat die Effekte, die sich aus der Wechselwirkung dieser Faktoren mit Stress ergeben können, zu berücksichtigen. Man denke z. B. an die stressbedingt nachlassende Kontrolle des Handelns einer handelnden Person durch Teammitglieder (siehe Abschnitt 4.1.3) mit der Folge, dass Fehler des Handelnden eher unentdeckt bleiben bzw. die bedingte Wahrscheinlichkeit einer unterlassenen Reaktion auf einen Fehler höher ausfällt als in einer stressfreieren Situation (Faktor „Abhängigkeit“). Solche Wechselwirkungen stehen auch in einer nicht-dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse zur Analyse und Bewertung an, bedürfen also keiner gesonderten Methodenentwicklung für den Fall dynamischer probabilistischer Sicherheitsanalysen.

4.1.5 Bewältigung überlagerter Ereignisse

Das Personal steht vor besonderen Herausforderungen, wenn es mehrere Ereignisse innerhalb desselben Zeitfensters zumindest zeitweise simultan bewältigen muss. Diese Herausforderungen bestehen vor allem in der Diagnose sowie der Organisation des Einsatzes von Personal und sonstigen Ressourcen. Wie in den vorangegangenen Abschnitten wird nachfolgend geklärt, inwieweit die Methodik für die Bewertung eine dynamische probabilistische Sicherheitsanalyse unterstützt. Die resultierende Anleitung für den Anwender findet man in Abschnitt 4.2.

Hat die Anlage Vorgehensweisen bei solchen Herausforderungen z. B. im Betriebshandbuch geregelt und dem Personal vermittelt, bietet THERP die Möglichkeit, diese Regelungen unter die Kategorie der „Anlagenpolitik“ zu fassen und zu bewerten (vgl. dazu auch /SWA 83/, S. 16-2 und Tabelle 16-1 (1)). Fehlen derartige Regelungen, sind sie zu ungenau oder werden sie nicht befolgt, stehen ad hoc Entscheidungen der handelnden Personen vor allem auf den Führungsebenen an. Evtl. Fehlentscheidungen sind mit vorhandenen Methoden bewertbar:

- Zeitaufwände für Entscheidungsprozesse und Zeitverluste durch Fehlentscheidungen können anhand geeigneter Beobachtungen und (oder) Expertenurteile unter Berücksichtigung zufälliger Schwankungen abgeschätzt werden.

- Führt eine Fehlentscheidung zu einem Eingriff, der den Anlagenzustand weiter verschlechtert, steht zur Bewertung eine eigene Methode bereit /FAS 03/. Ihre Anwendung in einer dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse umfasst folgende Schritte bei der Modellierung des Handlungsablaufs:
 - Ohne die Umsetzung kann eine Fehlentscheidung nicht handlungswirksam werden. Das Modell des Handlungsablaufs muss also auf jeden Fall einen Schritt enthalten, der die Ausführung des Fehleingriffs repräsentiert. Der Ausführungszeitpunkt hängt von der stochastisch verteilten Dauer des Entscheidungsprozesses und den Handlungen ab, die der Ausführung des Eingriffs vorausgehen müssen (z. B. die Erteilung der entsprechenden Anweisung, das Aufsuchen der Betätigungseinrichtung). Das Modell des Handlungsablaufs kann Verzweigungen enthalten, dass die Anweisung, den Eingriff auszuführen, und (oder) ihre Ausführung versehentlich unterbleiben. Letzteres kann beispielsweise geschehen, wenn die mündlich erteilte Anweisung nur eine in einer längeren Liste ist, die der Ausführende vor Ort nicht mehr vollständig erinnert.
 - Aus einem früheren Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der GRS /PES 06/ liegen Abschätzungen für die zufallsverteilten Zeitaufwände vor, die Erteilung der Anweisung für einen Eingriff und dessen Ausführung in Anspruch nehmen. Die Dauer eines Entscheidungsprozesses variiert mit dessen Merkmalen (z. B. Zahl der Schritte des Entscheidungsverfahrens, Erreichbarkeit befugter Personen), sollte also fallweise z. B. durch Befragung der Entscheidungsträger ermittelt werden.
 - Die Fehlerträchtigkeit der Folgen einer Fehlentscheidung hängt auch von den dynamischen Wechselwirkungen zwischen Mensch und Technik ab. Man denke z. B. an einen Ereignisablauf, der sich schnell entwickelt und dazu führen kann, dass der falsche Eingriff, den eine Fehlentscheidung veranlasst hat, zu spät erfolgt, um wirksam zu werden. Der Methodenanwender hat daher auch Informationen darüber zu beschaffen und in seine Modellierung einzuarbeiten, wie lange es dauert, bis der Eingriff im Ereignisablauf seine schädliche Wirkung entfalten würde, und welchen zufälligen Schwankungen diese Zeitspanne unterliegt.
 - Allerdings unterliegt die Anwendung der Methode für die Bewertung schädlicher Eingriffe in einer MCDEDT-basierten probabilistischen Sicherheitsanalyse ähnlichen Einschränkungen wie die Nutzung des Ansatzes, den Swain für die Bewertung der Zuverlässigkeit des Diagnostizierens entwickelt hat (siehe oben).

Das zeigt eine nähere Betrachtung der nachfolgend aufgeführten Kategorien fehlerträchtiger Entscheidungssituationen, die in der Methode für die Bewertung schädlicher Eingriffe unterschieden werden und quantitativ bewertet sind:

- (1) Keine der leistungsbestimmenden Faktoren des Handelns kann sich so ungünstig auf den Entscheidungsprozess auswirken, dass das Personal im Ereignisablauf wegen dieser Faktoren nach bestem Wissen und Gewissen zu der festen Überzeugung kommen kann, es müsse einen bestimmten Eingriff ausführen, für den gilt: Das Personal erwartet aufgrund von Denk- und Urteilsfehlern von der Ausführung eine positive Wirkung des Eingriffs auf den Ereignisablauf, dieser führt aber stattdessen zu einer weiteren Verschlimmerung des Anlagenzustandes. Man denke z. B. an eine fehlerhafte, aber als solche nicht erkennbare Signalisierung, die das Personal zur Entleerung eines Behälters veranlassen könnte, dessen Inventar aber benötigt wird, um bestimmte Systeme effektiv zu kühlen. Die weiteren Bewertungskategorien sind die folgenden:
- (2) Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen leistungsbestimmenden Faktoren sind günstig. Auch nach Durchführung eines dennoch erfolgten schädlichen Eingriffs besteht noch die Möglichkeit einer Korrektur.
- (3) Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen leistungsbestimmenden Faktoren stellen sich teilweise ungünstig dar. Im Fall eines schädlichen Eingriffs besteht die Möglichkeit nachträglich korrigierend einzugreifen.
- (4) Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen leistungsbestimmenden Faktoren stellen sich überwiegend ungünstig dar. Es besteht die Möglichkeit nachträglich korrigierend einzugreifen.
- (5) Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen leistungsbestimmenden Faktoren stellen sich überwiegend ungünstig dar. Es sind keine Korrekturmöglichkeiten vorhanden (/FAS 03/, S. 177).

In den Kategorien (2) bis (4) liegt eine Verbindung mehrerer Aktionen vor, die im Ereignisablauf zeitlich mehr oder weniger weit auseinanderliegen können. Diese Aktionen sind der schädliche Eingriff, die Erkennung dieses Fehlers und seine Behebung. In einer MCDET-basierter dynamischer probabilistischer Sicherheitsanalyse führt dies zu dem Problem, dass in der Simulation zum Zeitpunkt des schädlichen Eingriffs bereits die Information über die weitere Entwicklung des Anlagenzustands und die Möglichkeiten vorliegen muss, in diesem zu-

künftigen Anlagenzustand den Fehler zu erkennen und zu beheben (oder nicht). Zur Bewältigung dieser Problematik wird in der vorliegenden Methodenentwicklung eine Einschränkung eingeführt: Die Methode für die Bewertung schädlicher Eingriffe wird nur dann in einer MCDET-basierter probabilistischer Sicherheitsanalyse angewendet, wenn ein schädlicher Eingriff, die Erkennung dieses Fehlers und die Einleitung der Fehlerbehebung zeitlich so dicht aufeinanderfolgen, dass sie wie eine einzelne Aktion betrachtet und in die Simulation als eine Einheit eingehen können.

THERP wie auch die Untersuchungen von Weston et al. /WES 87/ unterstützen die Diagnose übergreifender, überlagerter und voneinander abhängiger Ereignisse in folgendem Umfang und mit den nachstehenden Einschränkungen:

- Treten Ereignisse nacheinander ein und ist ihr Eintritt so auffällig, dass sie die Aufmerksamkeit des Personals gewiss auf sich lenken, hängt es nach Swain vom zeitlichen Abstand der Ereignisse ab, wie ihre Diagnosen zu bewerten sind (vgl. /SWA 83/, S. 12-16ff).
- Folgen die einzelnen Ereignisse so dicht aufeinander, dass die Diagnose eines Ereignisses das Personal noch bindet, wenn ein weiteres Ereignis auftritt, verschiebt sich dessen Diagnose in Swains Ansatz um eine bestimmte Zeitspanne. Dieser Fall überlagerter Ereignisse liegt nach Swain vor, wenn je zwei direkt aufeinander folgende Ereignisse innerhalb eines Zeitfensters von maximal zehn Minuten Dauer eintreten. Im Bewertungsansatz sieht Swain vor, dass die Diagnose des zweiten Ereignisses zehn Minuten später beginnt als die Diagnose des ersten Ereignisses. Bis auf diese Verschiebung ändert sich an der Zeit-Zuverlässigkeitskurve, die Swain für die Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit vorsieht, nichts: eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für die korrekte Diagnose wird beim zweiten Ereignis zehn Minuten später erreicht als beim ersten. Swains Bewertungsdaten unterstützen explizit die Zuverlässigkeitsbewertung von drei Ereignissen, wobei ein nachfolgendes Ereignis seinem unmittelbaren Vorgänger jeweils mit maximal zehn Minuten Abstand folgt und die drei Ereignisse folglich innerhalb einer Zeitspanne von maximal zwanzig Minuten anstehen. Die Diagnose des jeweils unmittelbar vorhergehenden Ereignisses wird in der Bewertung der Diagnose des direkt nachfolgenden Ereignisses durch einen Zuschlag von zehn Minuten berücksichtigt. Beim dritten von drei Ereignissen beginnt die Diagnose also zwanzig Minuten nach Eintritt des allerersten Ereignisses.

- Bei größeren zeitlichen Abständen zwischen unmittelbar aufeinander folgenden Ereignissen kann man also davon ausgehen, dass die Diagnosen der Einzelergebnisse sukzessive so erfolgen, dass die Diagnose des eines vorausgehenden Ereignisses das Personal nicht mehr bindet, wenn das direkt folgende Ereignis eintritt.
- Es gilt, dass Swain seine Bewertungsdaten nicht als „sklavisch“ einzuhaltende Vorgaben betrachtet. Der Anwender kann und soll Änderungen vornehmen, die den spezifischen Gegebenheiten seines Anwendungsfalls Rechnung tragen. Änderungen dieser Art sind nachvollziehbar zu begründen und darzustellen. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich also ausdrücklich auf den Bewertungsansatz, wie ihn Swain in der referenzierten Quelle dokumentiert hat.
- Methodisch lässt dieser Ansatz verschiedene Punkte offen: Swain unterstellt implizit, dass das Personal die dicht aufeinanderfolgenden Ereignisse als verschiedene, voneinander abgegrenzte Ereignisse erkennt, dass also innerhalb der maximal zehn Minuten die Art des Ereignisses im Grunde geklärt ist und das Personal sich vor allem dem direkt nachfolgenden Ereignis zuwenden kann. Diese Voraussetzung des Bewertungsansatzes ist u. a. nicht mehr erfüllt, wenn eine stichhaltige Diagnose es erfordert, Informationen abzuwarten, die erst nach zehn Minuten und mehr vorliegen oder wenn die klare, wechselseitige Unterscheidung der einzelnen Ereignisse schwierig ist oder die Diagnose eines nachfolgenden Ereignisses die Revision der Diagnose vorausgegangener Ereignisse erfordern sollte.
- Der einfache Zuschnitt des vorgestellten Ansatzes lässt sich zum einen dadurch erklären, dass Swain seine Methodenentwicklungsarbeit zur Diagnose auf Einzelereignisse konzentriert hat. Zum anderen legt Swain der Bewertung den maximal verfügbaren Zeitrahmen für die Diagnose zugrunde (siehe Abschnitt 4.1.2) und weist selbst ausdrücklich darauf hin, dass die kognitiven und kommunikativen Prozesse des Diagnostizierens nicht Gegenstand seiner Modellierung und Analyse sind (SWA 83/, S. 12-9 ff.). Kommunikationsvorgänge spielen insofern eine Rolle, als Swain die Diagnose als eine in der Regel kollektive Leistung v.a. der Schichtmannschaft versteht. Sein Ansatz unterstützt also „nur“ die Bewertung, dass rechtzeitig und richtig diagnostiziert wurde, nicht aber wie diese Diagnose abgelaufen und erzielt worden ist. Zum anderen gilt der Bewertungsansatz unabhängig davon, um welche Art des Ereignisses es sich handelt.

- Die Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit sollte also durch eine genauere Klärung der kollektiven Überlegungen und sonstigen diagnostischen Aktivitäten (wie z. B. der Beschaffung bestimmter Informationen) soweit geklärt und untermauert werden, dass der Methodenanwender die Modellierung der gesamten diagnostischen Phase als Abfolge aufeinanderfolgender Diagnosen einzelner Ereignisse begründen kann. Zur Klärung sollte der Methodenanwender gezielte geeignete Beobachtungen und Befragungen des Personals durchführen. Das kann z. B. dadurch geschehen, dass der Anwender sich im Nachhinein erläutern lässt, welche Überlegungen der Diagnose zugrunde gelegen haben und (oder) indem er das Personal dazu anhält, seine Gedanken während des Diagnostizierens zu verbalisieren, und das Gehörte aufzeichnet.
- Swains Ansatz für die Quantifizierung der Diagnosezuverlässigkeit ist nur nutzbar, wenn der Anwender anhand der gewonnenen Informationen ersieht, dass das Personal die zeitlich in dichter Folge eintretenden Ereignisse klar als Zusammentreffen voneinander abgegrenzter Einzelereignisse erkennt und sie nacheinander diagnostiziert. Unterstützen Beobachtungen und Befragungen diese Beurteilung nicht, ist konservativ davon auszugehen, dass die erforderlichen Diagnosen sicher unterbleiben.
- Auf die Diagnose folgt die Ausführung der Aktionen, die sich aus der Diagnose als Mittel und Weg zur Bewältigung des diagnostizierten Ereignisses ergeben. Swains Ansatz beruht auf der unausgesprochenen Voraussetzung, dass die Diagnosen nachfolgender Ereignisse bewertet werden können, ohne zu berücksichtigen, dass gleichzeitig Aktionen im Gefolge schon diagnostizierter Ereignisse zur Ausführung anstehen. Befinden sich genug Personal und Ressourcen auf der Anlage, um die Diagnose eines Ereignisses B und die Ausführung der erforderlichen Aktionen nach erfolgter Diagnose eines vorangehenden Ereignisses A gleichzeitig zu bewältigen, beeinträchtigen sich die Aufgaben in der Bearbeitung nicht, sobald jeder Aufgabe das erforderliche Personal und die benötigten Mittel zugewiesen sind. Die Situation stellt sich anders dar, wenn z. B. die Schichtmannschaft auf sich allein gestellt ist: Mitglieder der Schichtmannschaft stehen für die Diagnose von Ereignis B im Team nicht mehr zur Verfügung, wenn sie die Prozeduren für Ereignis A abarbeiten. Bzw. sie können an dieser Diagnose mitwirken, wenn die Ausführung der Prozedur einen Aufschub erfährt. Der Methodenanwender hat zu klären, ob es für diese Fälle Regelungen in der „Anlagenpolitik“ gibt, ob sie umgesetzt werden oder ob ad hoc Entscheidungen mit

sicherheitstechnisch unzulässigen Folgen gefällt werden (s. o.). Beispiele solcher Entscheidungen sind zum einen die Hintanstellung der Ausführung einer erforderlichen Prozedur nach Diagnose des Ereignisses A, um genug Personen für die Diagnose eines weiteren Ereignisses B zu haben. Zum anderen könnte genug Personal für die Prozedur A abgestellt werden, dann aber für die erfolgreiche Diagnose des Ereignisses B fehlen.

- Im Prinzip gilt die Problematik der zu knappen Ressourcen an Personal und Mitteln generell für die zumindest teilweise, gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Aufgaben. Da diese Problematik von der Verfügbarkeit zum Einsatzzeitpunkt abhängt, hat die Methodik die Vorkehrungen und Vorgehensweisen zur rechtzeitigen Aufbietung und Bereitstellung erforderlicher Personen und Dingen als leistungsbestimmende Rahmenbedingung für zuverlässiges Diagnostizieren und Handeln bei einzelnen oder mehreren Ereignissen einzubeziehen (siehe Abschnitt 4.1.4).
- Die Bewertungsdaten für die Diagnosezuverlässigkeit nach Weston et al. gelten für Einzelereignisse (vgl. /WES 87/, Tabelle 3.2.3-1). Das Vorgehen bei zeitlich überlagerten Ereignissen ist nicht Gegenstand dieses Bewertungsdatensatzes. Weston et al. stellen Zeit-Zuverlässigkeits-Kurven für zwölf Ereignisgruppen bereit. Sie können, wie oben ausgeführt, als Alternative zu Swains Vorgehen bei der Zuverlässigkeitsbewertung der Diagnose eines Einzelereignisses dienen, sofern letzteres in eine der zwölf Ereigniskategorien nach Weston et al. /WES 87/ fällt (siehe Abschnitt 4.1.2). Daraus ergibt sich auch eine Beschränkung auf die Bewertung mehrerer einzelner Ereignisse, die in enger zeitlicher Nachbarschaft eintreten. Jede Erweiterung der Methodik auf solche Fälle unterliegt der Einschränkung, dass alle beteiligten Ereignisse in eine der zwölf Ereigniskategorien fallen.
- Es kann mehr oder minder lange dauern, zu erkennen, dass mehrere Ereignisse zusammen oder in enger zeitlicher Nachbarschaft aufgetreten sind. Fallen alle drei Ereignisse in eine der zwölf Kategorien, für die Weston et al. /WES 87/ Zeit-Zuverlässigkeitskurven vorgelegt haben, kann man diesen Vorspann durch ein Zeitfenster von hinreichender Länge berücksichtigen. Diese Länge und zufällige Schwankungen sind mit geeigneten Informationen (Beobachtungen, Experteneinschätzungen und deren Kombination) abzuschätzen. Der Methodenanwender sollte möglichst genau in Erfahrung zu bringen versuchen, wie das Personal die diagnostischen Aufgaben bearbeitet und bewältigt hat, um seine Modellierung nachvollziehbar begründen zu können. Es gelten, was die Folgen möglicher Engpässe bei Personal und

Ressourcen bzw. die Überwindung u. a. durch Alarmierung der Rufbereitschaften usw. betrifft, dieselben Überlegungen, die eben für die Modellierung überlagerter Ereignisse im Rahmen von THERP vorgetragen worden sind.

Als Fazit gilt, dass die Diagnose übergreifender Einwirkungen bzw. der zugehörigen, zeitlich überlagerten Einzelereignisse Ergänzungen der Bewertungsmethodik erfordern. Diese Erweiterungen sind systematisch zusammengeführt in der nachfolgenden Anleitung für die praktische Anwendung zu finden.

4.2 Anwendungsorientierte Dokumentation der methodischen Weiterentwicklungen

Zweck der nachfolgenden Zusammenstellung ist es, die praktische Anwendung der Erkenntnisse zu erleichtern, die im vorliegenden Projekt zur Methodik für die Analyse und Bewertung der Personalhandlungen im Rahmen einer MCDET-basierten dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse erarbeitet worden sind und die besonderen Herausforderungen übergreifender Einwirkungen zu berücksichtigen. Die Präsentation erfolgt in Form von Kernsätzen und Merkpunkten, wie bei der Analyse und Bewertung konkret vorzugehen ist, ohne in der Regel die Überlegungen in Abschnitt 4.1 wiederzugeben, auf denen diese Empfehlungen zum Vorgehen beruhen. Sofern Inhalte öffentlich zugänglicher Quellen Teil der hier präsentierten Methodik sind, werden sie im Regelfall referenziert, aber nur dann zitiert oder paraphrasiert, wenn es sich um kürzere Passagen handelt. Die Darstellung gliedert sich in vier Teile zu:

- einschlägigen Regelungen in der betrieblichen Anforderung (im Sinne der „plant policy“ nach Swain),
- fatalen Entscheidungsfehlern,
- diagnostischen Aktivitäten und
- leistungsbestimmenden Faktoren.

4.2.1 Einschlägige Regelungen der Betriebsanforderung

„Betriebsanforderung“ bezeichnet nach Swain ganz allgemein die Forderungen, die für den Betrieb einer Anlage gelten und deren Einhaltung die Führung von den Mitarbeitern erwartet (siehe /SWA 83/, S. J-23).

Der Methodenanwender hat die Betriebsanforderungen auf konkrete Anweisungen v. a. zur Alarmierung, zum Vorgehen bei der Diagnose und zu Prioritätensetzungen beim Einsatz des Personals und der Ressourcen zu berücksichtigen. Die Umsetzung einschlägiger Anweisungen hat größte Bedeutung für die zeitliche Entwicklung und den genauen Ablauf der Bewältigung eines übergreifenden oder sonstigen Ereignisses:

- Die Alarmordnung des Betriebshandbuchs und die darauf aufbauenden weiteren Regelungen der Anlage legen fest, innerhalb welcher Zeitspannen welches Personal in welcher Sollstärke auch außerhalb der regulären Arbeitszeiten im Bedarfsfall auf der Anlage zum Einsatz zur Verfügung zu stehen hat. Unterlagen dieser Art enthalten auch Anweisungen zur Information externer Stellen und der Zusammenarbeit mit diesen Stellen. Das auf der Anlage befindliche Personal kann sich also innerhalb bestimmter Zeitspannen gezielt um benötigte Personen verstärken und erforderliche Ressourcen heranziehen.
- Diagnosen können durch geeignete Anleitungen im Betriebs- und Notfallhandbuch unterstützt werden, indem z. B. durch die systematische Abfrage bestimmter Kriterien die Art des Ereignisses eingegrenzt und die Auswahl bestimmter Prozeduren bzw. sonstiger Aktionen vorstrukturiert wird. Es ist zu erwarten, dass Hilfsmittel dieser Art den Zeitaufwand für Diagnose der Ereignisse und Planung des Vorgehens vermindern und die Zuverlässigkeit erhöhen, mit der das Personal diese Aufgaben erfüllen kann.

Anleitungen zur Unterstützung der Diagnose werden in der vorliegenden Methodik als Faktor betrachtet, der die Erkennung der Lage und die Auswahl der Prozedur so nachhaltig unterstützt, dass die Zuverlässigkeit der Diagnose im Rahmen des Swain'schen Bewertungsansatzes entsprechend Tabelle 12-5 (2) quantifiziert werden kann (siehe /SWA 83/, S. 12-23). D. h. der Methodenanwender nutzt die obere der drei Kurven in Abbildung 12-4 in /SWA 83/, S. 12-20. Die nachfolgenden Ausführungen können sich auf die Regelungen zur „Mobilisierung“ erforderlichen Personals und erforderlicher Mittel beschränken.

Eine probabilistische Sicherheitsanalyse erfordert es, die Zeitspannen zu bestimmen, in denen erforderliches Personal im Anforderungsfall an den Orten bereitsteht, an denen sie sich für den Empfang weiterer Informationen und (oder) Anweisungen für ihre jeweiligen Aufgaben im Ereignis befinden sollte. Dynamische und nicht-dynamische Analyse können sich im Detaillierungsgrad der Zeitangaben unterscheiden, die der Methodenanwender für die Analyse benötigt. Dieser Detaillierungsgrad ist für dynamische probabi-

listische Sicherheitsanalysen im Regelfall höher. Beispiele solcher Zeitspannen sind u. a. die Zeit, die

- ein Mitglied der Schichtmannschaft, das sich auf Rundgang in der Anlage befindet, benötigt, um in der Warte einzutreffen, wenn es dorthin beordert wird.
- eine Person, die zur Rufbereitschaft gehört und sich im Anforderungsfall außerhalb der Anlage aufhält, braucht, um sich in einem dafür vorgesehenen Teil der Anlage (z. B. die Arbeitsräume des Krisenstabes der Anlage) einzufinden.

Der Methodenanwender sollte solche Zeitspannen und ihre zufälligen Schwankungen systematisch, wie in Tab. 4.1 dargestellt, bestimmen:

Tab. 4.1 Bestimmung der stochastisch verteilten Zeitaufwände bis zum Erreichen des Orts für die Entgegennahme weiterer Informationen bzw. Anweisungen

Nr.	Schritt	Erläuterungen
1	Ermittlung des Personenkreises, der zu berücksichtigen ist: Anzahlen der Personen mit den erforderlichen Qualifikationen für die Aufgaben, deren Bearbeitung bei der Beherrschung des betrachteten Ereignisses innerhalb und evtl. auch außerhalb der Anlage ansteht	Zahl und Qualifikationen können von Ereignis zu Ereignis unterschiedlich sein. Neben dem Personal des Betreiberunternehmens sind alle Personen derjenigen Einrichtungen zu berücksichtigen, die in die Bewältigung des betrachteten Ereignisses einzubinden sind (z. B. Polizei, Feuerwehren umliegender Ortschaften).
2	Für jedes Mitglied dieses Personenkreises: Bestimmung des Ortes (auf bzw. außerhalb der Anlage), an dem sich die Person zu befinden oder einzufinden hat, um für den weiteren Einsatz verfügbar zu sein.	Der Ort sollte möglichst exakt bestimmt werden. Als Informationsquelle sind die Anweisungen der Anlage zu Räumen, Gebäudeteilen oder Sammelpunkten zu nutzen, die im Anforderungsfall aufzusuchen sind, um für den weiteren Einsatz verfügbar zu sein. Analoges gilt für Personen, die sich außerhalb der Anlage an bestimmte Orte zu begeben haben, um für den weiteren Einsatz verfügbar zu sein.
3	Für jedes Mitglied dieses Personenkreises: Ermittlung seines Aufenthaltsortes zum Zeitpunkt im betrachteten Ereignisablauf, zu dem die betreffende Person die Aufforderung erhält, sich zu dem Ort zu begeben, an dem sie sich für den weiteren Einsatz verfügbar zu halten hat.	Die betrachtete Person kann sich zu diesem Zeitpunkt bereits an dem Ort aufhalten, an dem sie bereitstehen sollte. In allen anderen Fällen ist der Aufenthaltsort der betrachteten Person zu ermitteln oder so weit einzugrenzen, wie es mit den Informationen möglich ist, die dem Methodenanwender zur Verfügung stehen. Solche Informationen sind insbesondere: Regelungen zur Arbeitszeit, Schichtpläne, Regelungen zum Aufenthaltsort von Rufbereitschaften, Regelungen zu den zulässigen Maximalzeiten für die Einsatzbereitschaft der verschiedenen Mitglieder der Krisenorganisation nach Alarmierung dieser Personen, übliche Routen der Rundgänger auf

Nr.	Schritt	Erläuterungen
		<p>der Anlage, absehbarer Aufenthaltsort der Person auf der Anlage zum Zeitpunkt des Rufs an den Ort, an dem sie sich für den weiteren Einsatz zur Verfügung zu halten hat.</p>
4	<p>Für jedes Mitglied dieses Personenkreises: Bestimmung des Wegs, den die Person im Regelfall nehmen wird (Berücksichtigung anderer Wege siehe Schritt 7)</p>	<p>Auf der Anlage sind Zeiten für das Passieren von Kontrollen, Schleusen usw. in die Wegezeit einzu beziehen. Analoges gilt für Orte, die außerhalb der Anlage aufzusuchen sind.</p>
5	<p>Für jedes Mitglied dieses Personenkreises: Bestimmung einer stochastischen Verteilung des Zeitbedarfs für den Weg zwischen Aufenthaltsort zum Zeitpunkt ihrer Beorderung zum Ort, an dem sich die Person zur Verfügung zu halten hat, und dem Erreichen dieses Ortes, sofern keine widrigen Umstände die Erreichung dieses Ortes erschweren (Berücksichtigung anderer Wege siehe Schritt 7).</p>	<p>Der Weg entfällt (Zeitbedarf: 0 Zeiteinheiten), falls sich die Person schon an dem Ort befindet, an dem sie weitere Informationen oder Anweisungen empfängt.</p> <p>Der Methodenanwender fasst seine Erkenntnisse aus den Schritten 2 bis 4 zu einer Verteilung zusammen, aus der hervorgeht, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich die Person zum Zeitpunkt $t \geq 0$ am Ort der Informations- bzw. Befehlsausgabe befindet.</p> <p>Für ein- und dieselbe Person müssen evtl. mehrere solcher Verteilungen bestimmt werden. Das gilt zum einen für Personen, die sich außerhalb ihrer Arbeitszeiten in einem bestimmten Umkreis um die Anlage oder einen anderweitig definierten Ort (z. B. zuhause) für einen Abruf zum Einsatz auf der Anlage bereithalten müssen. Diese unterschiedlichen Zeitverteilungen für dieselbe Person sind notwendig, wenn die Simulation auch Zufallseffekte beim Zeitpunkt des Ereigniseintritts einschließt. Zum anderen können auch unterschiedliche Zeitverteilungen erforderlich sein, wenn die betrachtete Person ihren Aufenthaltsort auf der Anlage während ihrer Arbeitszeit aufgabenbedingt wechselt (z. B. als Rundgänger). Der Methodenanwender sollte in diesem Fall Klassen absehbarer Aufenthaltsorte bilden, die vom Ort der Bereithaltung für den weiteren Einsatz etwa gleich weit entfernt sind, und für jede Klasse eine Zeitverteilung bestimmen. Zudem ist für jede Klasse eine Wahrscheinlichkeit zu spezifizieren, dass sich die betreffende Person an einem Ort aufhält, der zu dieser Klasse gehört.</p> <p>Im einfachsten Fall kann für eine bestimmte Wegezeit eine Gleichverteilung zwischen $t = 0$ und einem Maximalwert angesetzt werden.</p> <p>Der Einfachheit halber wird angenommen, dass unterschiedliche Personen unter sonst gleichen Bedingungen für die Zurücklegung derselben Wegstrecke gleich viel Zeit brauchen.</p> <p>Als Informationsquelle sollten soweit als möglich empirisch fundierte Informationen dienen: z. B. Zeitaufwände für die Arbeitsbereitschaft der verschiedenen Teile einer Krisenorganisation aus</p>

Nr.	Schritt	Erläuterungen
		<p>Alarmübungen, Erkenntnisse aus Anlagenbegehungen usw.</p> <p>Da die Wegezeit und damit die Zeitverteilung von evtl. benutzten Transportmitteln (Fahrzeuge, Aufzüge usw.) abhängt, hat der Methodenanwender nachzufragen, inwieweit solche Mittel auch im betrachteten Ereignis genutzt werden (dürfen). Man denke z. B. an das Verbot, im Brandfall mit Aufzügen zu fahren (siehe auch Schritt 7).</p>
6	<p>Für jedes Mitglied dieses Personenkreises: Bestimmung des Vorgehens, wie sie an den Ort gerufen wird, an dem sie sich für den weiteren Einsatz bereit zu halten hat.</p>	<p>Der Weg kann nur angetreten werden, wenn eine Person die Anweisung erhält und befolgt, den vorgesehenen Ort aufzusuchen. Methodenanwender berücksichtigen wie folgt, dass diese Anweisung Zeit kosten und fehlerträchtig sein kann:</p> <p>Sie bestimmen (z. B. anhand der Alarmordnung, weiterer einschlägiger Anweisungen und sonstigen Informationen des Betreibers oder aus der Anlagenbegehung) die festgelegte oder übliche Reihenfolge, in der zwei oder mehr Personen an einen Ort beordert werden, an dem sie sich bereit zu halten haben.</p> <p>Der nächste Schritt besteht in der Ermittlung des Zeitfensters, in dem die Kontaktaufnahme mit der jeweiligen Person erfolgt. Das Zeitfenster kann einerseits vom verwendeten Mittel abhängen (z. B. Anruf direkt bei der Person, Lautsprecherdurchsage mit Aufforderung zum Rückruf usw.). Kontaktaufnahme, Zeitbedarf für die Kontaktaufnahme und zugehörige zufällige Schwankungen sind entsprechend zu modellieren. Zum anderen ist bei der Bestimmung des Zeitfensters zu beachten, ob es bei der Kontaktaufnahme Verzögerungen gibt, weil die kontaktaufnehmende Person durch andere Aufgaben gebunden war und die Kontaktaufnahme entsprechend zurückgestellt hat.</p> <p>Die Kontaktaufnahme kann wegen technischer Probleme scheitern (Störung der Kommunikationseinrichtung, Unerreichbarkeit des Empfängers z. B. wegen eines „Funklochs“ usw.).</p> <p>Der Methodenanwender klärt diese Möglichkeiten und bezieht sie in seine Analyse ein, sofern sie im Ereignisablauf nicht vernachlässigt werden dürfen. Zu menschlichen Fehlern: siehe Tab. 4.2.</p>
7	<p>Berücksichtigung besonderer, für die Wegezeit zwischen Aufenthaltsort und Ort, an dem eine Person für den weiteren Einsatz bereitstehen soll</p>	<p>Ereignis und (oder) sonstige Rahmenbedingungen können sich auf die Zeitaufwände aus Schritt 5 auswirken. Vereinfachend berücksichtigt die vorliegende Methode nur Faktoren für Verzögerungen.</p> <p>Beispiele solcher Faktoren sind: erforderliche Umwege wegen Hindernissen, verlangsamte Fortbewegung auf dem üblichen Weg (z. B. wegen Glatt-eises), Ausfall üblicher Transportmittel (keine Nutzung von Aufzügen im Brandfall).</p>

Nr.	Schritt	Erläuterungen
		Die Person kann die Anweisung erhalten, den vorgesehenen Ort nicht nur aufzusuchen, sondern dabei zusätzliche Aufgaben zu erledigen (z. B. Mitnahme bestimmter Dinge). Sofern diese Aufgaben die Wegezeit verlängern und nicht schon in Schritt 5 berücksichtigt sind, korrigiert der Methodenanwender die Zeitverteilungen aus Schritt 5 entsprechend.
8	Berücksichtigung der Unzugänglichkeit eines aufzusuchenden Ortes	Beispielweise hat der Krisenstab für seine Arbeit einen vorgesehenen und entsprechend ausgestatteten Ersatzort (u. U. auch außerhalb der Anlage) aufzusuchen, wenn die eigentlich vorgesehenen Räumlichkeiten nicht zur Verfügung stehen oder aufgegeben werden müssen. Schritte 1 bis 7 werden für den Ausweichort durchlaufen.

Auch in einer nicht-dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse ist es wichtig, Informationen möglichst im vorgestellten Detaillierungsgrad zu ermitteln, um dann auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse zu klären, wann welche Personen auf der Anlage spätestens für den Einsatz bereitstehen. Der Methodenanwender sollte bei nicht-dynamischen Analysen durch hinreichend detaillierte Informationen den Fehler vermeiden, zu kurze Zeiten für die Bereitschaft erforderlicher Personen auf der Anlage anzusetzen und dadurch u. U. eine unrealistisch hohe Zuverlässigkeit der Ereignisbewältigung zu ermitteln. Dies würde der prinzipiellen Aussage einer klassischen PSA widersprechen, konservativ abdeckend zu sein.

Im Crew-Modul wird die Beorderung erforderlicher Personen an den Ort, an dem sie sich für den weiteren Einsatz bereitzuhalten haben, über folgende generische Handlungssequenz repräsentiert:

- Kontaktaufnahme der dafür zuständigen Person A mit der betroffenen Person B.
- Übermittlung der Anweisung von A an B, sich an einen bestimmten Ort für den weiteren Einsatz bereitzuhalten.
- Empfang und Umsetzung der Anweisung durch B.

Diese generische Sequenz ist u. U. um Aktionen zu erweitern, die sich aus Schritten 6 und 7 in Tab. 4.1 ergeben. Sind mehrere Personen A und (oder) mehrere Personen B zu berücksichtigen, hat dies für Schritt 6 aus Tab. 4.1 die Folge, dass mehrere Personen B gleichzeitig kontaktiert werden können oder sequentiell kontaktiert werden müs-

sen, je nachdem, inwieweit genügend Personen A zur Verfügung stehen, um alle Personen B gleichzeitig zu benachrichtigen.

Die nachfolgende Tab. 4.2 fasst die Fehlermöglichkeiten zusammen, die mit den menschlichen Handlungen in der generischen Handlungssequenz verbunden sein können (zu technischen Fehlern: siehe die Erläuterungen zu Schritt 6 in Tab. 4.1).

Tab. 4.2 Zu berücksichtigende menschliche Fehler bei der Bereitstellung erforderlichen Personals für den Einsatz im Ereignis

Fehlermöglichkeit	Quantifizierung	Erläuterungen
Kontaktaufnahme der dafür zuständigen Person A mit der betroffenen Person B	/SWA 83/, Tabelle 16-1 (1)	<p>Die Methode ordnet die Alarmordnung oder andere Vorgaben zur Verstärkung des Personalbestandes der Anlagenpolitik im Sinne Swains zu.</p> <p>Wird der Fehler erkannt, steht die betreffende Person erst bereit, wenn die Kontaktaufnahme nach der Fehlererkennung erfolgt. Konsequenzen resultierender Verzögerungen für den weiteren Handlungsverlauf sind zu berücksichtigen.</p> <p>Der Fehler ist für Personen B zu vernachlässigen, die eine so gewichtige Rolle haben (z. B. Einsatzleiter des Krisenstabes), dass die Unterlassung einer Kontaktaufnahme ausgeschlossen werden darf.</p>
Übermittlung der Anweisung von A an B, sich an einen bestimmten Ort für den weiteren Einsatz bereitzuhalten	P = 0	<p>Es ist nicht plausibel, anzunehmen, dass die Kontaktaufnahme durch A zum Zweck der Beorderung von B an einen bestimmten Ort erfolgt, ohne B mitzuteilen, sich zu diesem Ort zu begeben. Die Kenntnis des Ortes kann für B zudem trivial sein (z. B. die Warte für einen Rundgänger, der zur Schichtmannschaft in der Warte gehört).</p>
Empfang und Umsetzung der Anweisung durch B	<p>P = 0, falls es sich um eine einzelne mündlich erteilte Anweisung handelt.</p> <p>Bei mehreren mündlich erteilten Anweisungen: /SWA 83/, Tabelle 15-1 ohne Zeile (1)</p> <p>Bei schriftlich übertragenen Anweisungen: Expertenschätzung</p>	<p>Es ist nicht plausibel, dass B die Ausführung der Anweisung unterlässt, sich für den weiteren Einsatz an einen bestimmten Ort zu begeben. Er wird sich der Wichtigkeit dieser Maßnahme zu bewusst sein, um die Anweisung zu vergessen, den bezeichneten Ort aufzusuchen.</p> <p>Bei der korrekten Erinnerung an mündlich erteilte Anweisungen, die über die Beorderung an einen bestimmten Ort hinausgehen (siehe Tab. 4.1, Schritt 7), können Fehler des Vergessens auftreten, sofern man nicht begründet davon ausgehen darf, dass B diesen Anweisungen mindestens die gleiche Aufmerksamkeit zuwendet wie derjenigen, sich an einem bestimmten Ort für den weiteren Einsatz bereitzuhalten.</p> <p>Bewertungsdaten für Ablesefehler bei schriftlichen Informationen beschränken sich bei</p>

Fehlermöglichkeit	Quantifizierung	Erläuterungen
		Swain auf Anzeigen in der Warte. Sollte der Methodenanwender über andere Datenquellen verfügen (z. B. andere Bewertungsmethoden, Experimente), nutze er sie als Teil oder anstelle einer Expertenschätzung.
Verwechslungsfehler von A oder B bei der Angabe oder Aufsuchung des Ortes für den weiteren Einsatz	Expertenschätzung	Mangels Daten in /SWA 83/ verfahren der Methodenanwender wie bei „Empfang und Umsetzung der Anweisung durch B“.
Die aufgeführten Fehlermöglichkeiten können die Folge vorangegangener Fehler, also von letzteren abhängig sein.	/SWA 83/, Tabelle 10-2	/SWA 83/, Tabelle 10-2 unterstützt die Bewertung von Fehlern, die evtl. vorangegangene mit mehr oder minder hoher Wahrscheinlichkeit nach sich ziehen können.

Ereignisse können die Bereitstellung bestimmter Mittel erfordern. Die vorliegende Methodik führt diese Bereitstellung auf die Beorderung der Mittel an einem bestimmten Ort zurück, wo sie für den Einsatz bereitgehalten werden. Dazu sind die Akteure (Besteller, Auslieferer, Transporteure usw.), Zeitspannen und Zuverlässigkeit der Bereitstellung erfolgen deshalb in der vorliegenden Methodik wie in Tab. 4.1 beschrieben, wobei nur die in Schritt 7 der Tabelle vorgesehene Erweiterung zu berücksichtigen ist, einen bestimmten Ort aufzusuchen und dabei auch bestimmte Güter mitzubringen.

Die Methodik hat auch den Fall abzudecken, dass bei der „Mobilisierung“ des erforderlichen Personals bzw. benötigter Mittel Beurteilungs- und Entscheidungsfehler unterlaufen. Letztere werden nachfolgend abgehandelt.

4.2.2 Entscheidungsfehler

Entscheidungen liegen vor, wenn in einer Situation mehrere, konfligierende Handlungsoptionen bestehen, unter denen der Handelnde eine Wahl zu treffen hat. Es bedarf also eines Abwägens zwischen den Alternativen und eines Kriteriums für die Auswahl unter den Optionen mit ihren jeweiligen Vorzügen bzw. Nachteilen. Der Einfachheit halber geht die vorliegende Methode davon aus, dass eine ausgewählte Option auch umgesetzt wird. Diese Option kann darin bestehen, nichts zu tun.

Prozess und Ergebnis des Entscheidens hängen von leistungsbestimmenden Faktoren wie beispielsweise der verfügbaren Zeitspanne, Informationen und Fachkompetenzen

ab, die ein qualifiziertes Entscheiden erfordert. Die Methode der GRS zur Bewertung schädlicher Eingriffe (siehe /FAS 03/) berücksichtigt Beeinträchtigungen dieser Faktoren und ihre möglichen Folgen in Form eines sicherheitstechnisch unzulässigen, also für die Anlage schädlichen Eingriffes (siehe oben 4.1.5). Mit dieser Methode kann man also Entscheidungssituationen analysieren und bewerten, in denen das korrekte Erkennen der Entscheidungssituation, der Handlungsoptionen und ihrer jeweiligen Konsequenzen (Kosten und Nutzen) im Ausführungsfall Beeinträchtigungen unterliegt. Die Beurteilung der Beeinträchtigungen erfordert ein Expertenurteil, das durch möglichst detaillierte Informationen aus der Anlagenbegehung fundiert zu sein hat. Als Quelle für die Bewertungsdaten dienen Erkenntnisse aus der Systemergonomie (vgl. /FAS 03/, S. 176 f.). Da Entscheidungssituationen sehr vielfältiger Art sein können, sind die Beurteilungskategorien sehr allgemein formuliert. Tab. 4.3 fasst den Bewertungsansatz zusammen.

Tab. 4.3 Bewertung von Fehlentscheidungen mit der Folge schädlicher Eingriffe

Nr.	Beurteilungskategorie	Fehlerwahrscheinlichkeit (Erwartungswert / Unsicherheitsfaktor)
1	Keine der leistungsbestimmenden Faktoren des Handelns kann sich so ungünstig auf den Entscheidungsprozess auswirken, dass das Personal im Ereignisablauf wegen dieser Faktoren zu der festen Überzeugung kommen kann, es müsse einen bestimmten Eingriff ausführen. Dessen Ausführung entfaltet aber nicht die vom Personal erwartete positive Wirkung auf den Ereignisablauf, sondern verschlimmert ihn. Zu den leistungsbestimmenden Faktoren zählt in der vorliegenden und den nachfolgenden Beurteilungskategorien auch der Stress (siehe 4.1.3).	0
2	Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen leistungsbestimmenden Faktoren sind günstig. Auch nach Durchführung eines dennoch erfolgenden schädlichen Eingriffes besteht noch die Möglichkeit einer Korrektur.	$1 \cdot 10^{-2} / 10$
3	Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen leistungsbestimmenden Faktoren stellen sich teilweise ungünstig dar. Im Fall eines schädlichen Eingriffes besteht die Möglichkeit nachträglich korrigierend einzugreifen.	$1 \cdot 10^{-1} / 5$
4	Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen leistungsbestimmenden Faktoren stellen sich überwiegend ungünstig dar. Es besteht die Möglichkeit nachträglich korrigierend einzugreifen.	$5 \cdot 10^{-1} / 5$
5	Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen leistungsbestimmenden Faktoren stellen sich überwiegend ungünstig dar. Es sind keine Korrekturmöglichkeiten vorhanden.	1,00

Die Anwendung dieses Bewertungsansatzes unterliegt bestimmten Voraussetzungen:

- In einer MCDET-basierten probabilistischen Sicherheitsanalyse gilt zum einen die Einschränkung, dass die Bewertung mit den Kategorien 2 bis 4 nur möglich ist, wenn schädlicher Eingriff, Erkennung dieses Fehlers und Einleitung der Fehlerkorrektur zeitlich so dicht aufeinanderfolgen, dass sie wie eine einzelne Aktion behandelt werden können. In allen anderen Fällen müsste die Simulation zum Zeitpunkt des Eingriffs schon „wissen“, dass sich der weitere Ereignisablauf so entwickeln wird, dass der Anlagenzustand die Erkennung und Behebung des Fehlers erlaubt. Diese Restriktion ist mit dem streng kausalen Vorgehen einer MCDET-basierten Simulation nicht verträglich (s. o. Abschnitt 4.1.5).
- Der Anwender muss zudem beachten, dass er die Bewertungsmethode aus Tab. 4.3 nur nutzen kann, wenn der betrachtete Eingriff tatsächlich aus sicherheitstechnischer Sicht schädlich ist. Er muss die Simulation also vorab mit Informationen versorgen können, dass bestimmte Aktionen bei bestimmten Anlagenzuständen stets eine weitere Verschlechterung des Anlagenzustands nach sich ziehen. Solche Informationen könnten z. B. in den Beschreibungen der Systeme vorliegen, die im Ereignisablauf benötigt werden. Man denke etwa an Spezifikationen, zur Vermeidung irreversibler Schäden einen Eingriff E nur vorzunehmen, wenn das System unter einen bestimmten Grenzwert abgekühlt ist.

Ist eine der beiden Voraussetzungen verletzt, ist die Bewertung nach Tab. 4.3 nicht möglich.

Zur Modellierung und Bewertung des Entscheidens sieht die vorliegende Methodik für das Crew-Modul, das den gesamten Handlungsablauf repräsentiert (siehe Abschnitt 4.1.1), folgende Handlungssequenz vor, die auch iterativ durchlaufen werden kann:

- Eine Person A erkennt im Ereignisablauf, dass eine bestimmte Entscheidung ansteht.
- Eine oder mehrere Personen widmen sich der Entscheidungsfindung, d. h. des Prozesses an dessen Ende die Entscheidung für eine bestimmte Option steht. Zu den Optionen kann diejenige gehören, nicht oder vorerst nicht aktiv zu werden. Person A kann an der Entscheidungsfindung beteiligt sein oder nicht. Die beteiligten Personen stehen je nach Art und Umfang ihrer Beteiligung nicht mehr für andere Aufgaben zur Verfügung. Die Entscheidungsfindung kann in Etappen erfolgen, die durch mehr oder minder große Zeitintervalle getrennt sind.

- Die gewählte Option wird umgesetzt. An der Umsetzung können Personen aus der Entscheidungsfindung mitwirken oder nicht. Zwischen Entscheidung für und Umsetzung der Option kann mehr oder minder viel Zeit liegen.

Die vorliegende Methodik sieht in Bezug auf das Entscheiden in erheblichem Umfang Expertenurteile vor:

- Entscheidungsprozesse kosten Zeit. Diese Zeitaufwände hängen insbesondere von der Komplexität der Entscheidungssituation, der Durchführung des Entscheidungsprozesses und zufälligen Schwankungen des Zeitbedarfs für die damit verbundenen Aktionen ab. Dem Methodenanwender wird empfohlen, diese Zeitaufwände unter Nutzung relevanter Informationen insbesondere aus der Anlagenbegehung möglichst realistisch abzuschätzen.
- Die Optionen können mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit gewählt werden. Diese Wahrscheinlichkeiten sind wie die Zeitaufwände mit den bestmöglichen Informationen aus der Anlagenbegehung abzuschätzen. Es wird empfohlen, die Unsicherheitsbänder um diese Wahrscheinlichkeiten nach den Vorgaben zu quantifizieren, die Swain zusammengestellt und in nachvollziehbarer Weise ausführlich begründet hat (siehe /SWA 83/, Tabelle 7-2).

Die nachfolgende Tab. 4.4 fasst das Gesagte für den Anwender zusammen.

Tab. 4.4 Vorgehen bei der Modellierung und Bewertung des Entscheidens

Nr.	Schritt	Quantifizierung der Zeitaufwände und der Zuverlässigkeit
1	Entscheidungsfindung	<ul style="list-style-type: none"> - Expertenschätzung zum Zeitaufwand für die Entscheidungsfindung und die nachfolgend aufgeführten Zeitspannen unter bestmöglicher Nutzung relevanter Informationen vor allem aus der Anlagenbegehung - Ermittlung und Berücksichtigung der Zeitspannen, an die Personen durch Beteiligung an der Entscheidungsfindung gebunden sind, bei ihren anderen Aufgaben im Ereignisablauf - Ermittlung und Berücksichtigung der Zeitspannen, die zu Verzögerungen der Entscheidungsfindung führen, weil Personen, die an der Entscheidungsfindung mitzuwirken haben, durch ihre anderen Aufgaben im Ereignisablauf gebunden sind - Unterbrechungen der Entscheidungsfindung sind zu modellieren, indem die einzelnen Etappen der Entscheidungsfindung an der chronologisch

Nr.	Schritt	Quantifizierung der Zeitaufwände und der Zuverlässigkeit
		<p>zutreffenden Stelle des gesamten Ereignis- und Handlungsablaufs eingebaut werden</p> <p>Im Regelfall (Ausnahme: siehe Schritt 2) sieht die vorliegende Methodik nicht vor, Entscheidungen bzw. daraus resultierende Aktionen als „richtig“ oder „falsch“ bzw. „rechtzeitig“, „verfrüht“ oder „verspätet“ zu beurteilen, weil sich solche Bewertungen oft erst aus der Dynamik Ablaufs ergeben.</p> <p>Wahrscheinlichkeiten für die Auswahl der einzelnen Optionen sind über Expertenschätzungen zu bestimmen. Dem Methodenanwender wird empfohlen, die Unsicherheitsbänder zu diesen Wahrscheinlichkeiten nach den Vorgaben zu quantifizieren, die Swain zusammengestellt hat (vgl. /SWA 83/; Tabelle 7-2). Im Regelfall (Ausnahme: siehe Schritt 2) sieht die vorliegende Methodik nicht vor, Entscheidungen bzw. daraus resultierende Aktionen als „richtig“ oder „falsch“ bzw. „rechtzeitig“, „verfrüht“ oder „verspätet“ zu beurteilen, weil sich solche Bewertungen oft erst aus der Dynamik Ablaufs ergeben.</p> <p>Wahrscheinlichkeiten für die Auswahl der einzelnen Optionen sind über Expertenschätzungen zu bestimmen. Dem Methodenanwender wird empfohlen, die Unsicherheitsbänder zu diesen Wahrscheinlichkeiten nach den Vorgaben zu quantifizieren, die Swain zusammengestellt hat (vgl. /SWA 83/; Tabelle 7-2).</p>
2	Umsetzung der gewählten Option	<p>Fällt die Entscheidung für die Option, nichts zu tun, was den Anlagenzustand ändern würde oder könnte, sind dennoch Aktionen der Kontrolle von Anzeigen, Meldungen der Kontrollergebnisse usw. zu modellieren.</p> <p>Die Methode aus Tab. 4.3 ist anwendbar, wenn die beiden, im Anschluss an die Tab. 4.3 genannten Voraussetzungen zutreffen. Der Methodenanwender schätzt mittels Expertenurteil ab, wieviel Zeit zwischen dem Beginn der Umsetzung der Option mit dem schädlichen Eingriff und dessen Vollzug verstreicht.</p> <p>In allen anderen Fällen wird die Option, für die sich das Personal entschieden hat, so modelliert wie im Crewmodul beschrieben (siehe Abschnitt 4.1.1).</p>

4.2.3 Diagnostische Aktivitäten

Tab. 4.5 zeigt im Überblick, wie diagnostische Aktivitäten im Rahmen der vorliegenden Methodik zu bewerten sind, wenn genau ein Ereignis vorliegt. Tab. 4.6 präsentiert das Vorgehen bei mehr als einem Ereignis.

Tab. 4.5 Methodik zur Bewertung diagnostischer Aktivitäten bei genau einem Ereignis

Wahl der Bewertungsmethode	Kriterium für die Wahl der Bewertungsmethode	Erläuterung(en)
Nominalmodell für die Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit nach Swain (vgl. /SWA 83/, Abb. 12-4 u. Tab. 12-5)	Der Ereignisablauf ist soweit bekannt und überschaubar, dass Experten tragfähige Abschätzungen der Zeiten T_A und T_{MAX} inklusive ihrer aleatorischen Unsicherheiten abgeben können.	Swain ermöglicht die Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit in Abhängigkeit von Faktoren, die das Ausmaß der Vertrautheit des diagnostizierenden Teams mit dem Ereignis erfassen (Näheres siehe /SWA 83/, Tab. 12-5).
Bewertungsdaten nach Weston et al (siehe /WES 87/)	Das Ereignis fällt in eine der zwölf Ereigniskategorien, die Tabelle 3.2.3-1 der zitierten Publikation vorsieht.	<p>Fällt das betrachtete Ereignis in keine dieser Kategorien, ist der Ansatz trivialerweise nicht anwendbar.</p> <p>Man beachte die Ausführungen zur Vergleichbarkeit beider Bewertungsansätze (von Swain bzw. Weston et al.) in Abschnitt 4.1.2.1.</p> <p>Könnten im Prinzip beide Ansätze angewendet werden, liegt die Entscheidung beim Methodenanwender: mögliche Auswahlgesichtspunkte sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit in Abschnitt 4.1.2.1 zu finden.</p> <p>Swains Ansatz ist allgemeiner als derjenige von Weston et al. /WES 87/, da Swain keine Bewertung in Abhängigkeit von Ereigniskategorien vorsieht.</p>
Annunciator Response Model nach Swain	Das Personal hat gelernt, auf einen bestimmten Alarm mit einer vorgesehenen Aktion zu reagieren, entfallen aufwendigere diagnostische Aktivitäten, die Lage korrekt zu erkennen und die erforderliche(n) Prozedur(en) auszuwählen.	Unter Alarm ist dabei jede auffällig signalisierende Anzeige eines Zustands gemeint, der eine bestimmte Reaktion erfordert.

Aus Tab. 4.6 wird dem Anwender ersichtlich, welches Prozedere die vorliegende Methodik im Fall der Diagnose vorsieht, wenn multiple, zeitlich überlagerte Ereignisse eintreten.

Tab. 4.6 Diagnose multipler Ereignisse

Nr.	Schritt	Erläuterung(en)
1	<p>Der Methodenanwender hat aufgrund seiner Informationen, vor allem aus der Anlagenbegehung zum einen zu beurteilen, inwieweit das Personal erkennt, dass es eine Situation zu bewältigen hat, in der zwei oder mehr Ereignisse zusammengetroffen sind. Zum anderen hat er die Art und Weise zu modellieren, ob das Personal die Diagnosen der einzelnen Ereignisse tatsächlich so angeht, wie von Swain angenommen (also in der Reihenfolge, in der sie eintreten).</p>	<p>Die Methode von Swain führt die Diagnose mehrerer Ereignisse, die sich zeitlich mehr oder weniger stark überlagern, auf die Diagnose der einzelnen Ereignisse zurück: Die Diagnosen der einzelnen Ereignisse erfolgen nacheinander mit einem gewissen zeitlichen Abstand. Jedes dieser Ereignisse wird mit dem Modell für die Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit für ein einziges Ereignis bewertet. Das zeitlich dicht gestaffelte Eintreten der Ereignisse wird durch einen Aufschub erfasst, mit dem die Diagnose eines Ereignisses beginnt, das eintritt, solange die Diagnose des unmittelbar vorher eingetretenen Ereignisses noch läuft.</p> <p>Weston et al. /WES 87/ gehen auf diese Situation nicht ein. Sie stellen nur Daten für die Bewertung einzelner Ereignisse bereit. Die Diagnose innerhalb eines Zeitfensters dicht aufeinander folgender Ereignisse kann im Prinzip also ebenfalls wie bei Swain auf die Diagnose der einzelnen Ereignisse zurückgeführt werden.</p> <p>Es ist nicht möglich, Swains Ansatz und eine entsprechende Erweiterung der Diagnosebewertung nach Weston et al. /WES 87/ anzuwenden, wenn eine Systemanalyse und (oder) Anlagenbegehung zeigen, dass einer der folgenden Fälle vorliegt:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Die einzelnen Ereignisse treten zeitgleich auf oder sie folgen so dicht aufeinander, dass sie dem Personal wie ein zeitgleiches Zusammentreffen mehrerer Ereignisse vorkommen. (2) Das Personal schafft es nicht, die einzelnen Ereignisse zu unterscheiden. Die Diagnose der Gesamtsituation kann in der Modellierung und Bewertung des Ereignisablaufs also nicht auf eine Abfolge einzelner Diagnosen zurückgeführt werden. (3) Das Personal diagnostiziert die Ereignisse nicht in der Reihenfolge ihres Eintretens, sondern nimmt früher oder später eine Priorisierung der Ereignisse vor. Das setzt einen Prozess des Entscheidens voraus, der über den Rahmen des Bewertungsansatzes nach Swain hinausgeht. (4) Swains Ansatz unterstellt, dass genug Personal, bereitsteht, um die Diagnose eines nachfolgenden Ereignisses aufzunehmen, solange die Diagnose des vorher eingetretenen Ereignisses noch läuft: Sobald die Diagnose des vorhergehenden Ereignisses eine bestimmte Zeitspanne (bei Swain zehn Minuten) gelaufen ist, steht also genug Personal zur Verfügung, um die Diagnose des nachfolgenden Ereignisses durchzuführen. Es ist auch zu berücksichtigen, dass die Ausführung der erforderlichen Prozeduren nach erfolgreicher Diagnose evtl.

Nr.	Schritt	Erläuterung(en)
		<p>nicht aufgeschoben werden kann und Personal bindet.</p> <p>(5) Es treten mehr als die drei von Swains Bewertungsansatz berücksichtigten Ereignisse auf.</p>
2	Bewertung	<p>Die vorliegende Bewertungsmethodik sieht vor: Swains Ansatz wird nur verwendet, wenn die maximal drei Ereignisse für das Personal erkennbar sukzessive auftreten, vom Personal korrekt unterschieden werden und genug Personal sowohl für die Diagnosen als auch die eventuell gleichzeitig laufenden Arbeiten (u. a. Ausführung erforderlicher Prozeduren) bereitsteht.</p> <p>Kann Swains Bewertungsansatz für Einzeldiagnosen nicht genutzt werden, verfahren der Methodenanwender wie in Tab. 4.5 vorgesehen.</p> <p>Der Methodenanwender ersetze die von Swain als Zeitabstand zwischen den Diagnosen angesetzten zehn Minuten um Zeitspannen (einschließlich ihrer zufälligen Schwankungen), die nach den Informationen vor allem aus der Anlagenbegehung realistisch sind. Der Methodenanwender berücksichtige dabei die Verfügbarkeit des erforderlichen Personals und der benötigten Ressourcen in Abhängigkeit von Eintreffen und Bereitstellung zusätzlich beordeter Personen und Mittel (siehe Tab. 4.1).</p> <p>In allen anderen Fällen modelliere der Methoden-anwender die Diagnose (und Beherrschung) multipler Ereignisse als einen Prozess der Findung und Umsetzung einer Entscheidung (vgl. Tab. 4.4) mit den Leitfragen, wie das Personal bei der Erkennung der Lage, der Handlungsoptionen, ihrer Kosten und ihres Nutzens sowie der Auswahl des Vorgehens konkret vorgeht.</p>

4.2.4 Leistungsbestimmende Faktoren

Das Crewmodul sieht vor, die leistungsbestimmenden Faktoren für jede Aktion bzw. Aktivität (z. B. Diagnosen) zu modellieren, die in den Handlungsablauf eingehen. Zeitliche Veränderungen leistungsbestimmender Faktoren sind also durch ihre Ausprägungen zu den verschiedenen Zeitpunkten erfasst und repräsentiert.

Aus diesem Ansatz des Crewmoduls ergibt sich die Anforderung an die Methode, die zur Analyse und Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit im Rahmen des Crewmoduls eingesetzt wird, dass diese die Analyse und Bewertung der leistungsbestimmenden Faktoren für jede einzelne Aktion und Aktivität unterstützt. Dies ist für die Methoden THERP bzw. ASEP der Fall. Analyse und Bewertung leistungsbestimmender

Faktoren stützen sich in der vorliegenden Methodik auf die Daten, die Swain in seinen Methoden bereitgestellt hat. Man beachte dabei, wie in Abschnitt 4.1.5 herausgestellt: Swain betrachtet seine Bewertungsdaten nicht als „sklavisch“ einzuhaltende Vorgaben. Der Anwender kann und soll Änderungen vornehmen, die den spezifischen Gegebenheiten seines Anwendungsfalls Rechnung tragen. Änderungen dieser Art sind nachvollziehbar zu begründen und darzustellen. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich also ausdrücklich auf den Bewertungsansatz, wie ihn Swain in der referenzierten Quelle dokumentiert hat.

Veränderungen bei leistungsbestimmenden Faktoren können sich durch Ausfall oder Beeinträchtigung der Arbeits- bzw. Funktionsfähigkeit des Personals, Ausrüstung oder Arbeitsorte und deren Ersatz bzw. die Wiederherstellung ergeben. Zur Ausrüstung gehören auch Einrichtungen, die für Herstellung bzw. Erhaltung erforderlicher Arbeitsumgebungsbedingungen erforderlich sind (z. B. Beleuchtung, Belüftung, Heizung, Kühlung usw.). Der Methodenanwender ermittelt, welche Regelungen die Anlage für solche Fälle vorsieht und wie das Personal (nach den Informationen v. a. aus der Anlagenbegehung) solche Veränderungen erkennt, wie es darauf reagiert, welche Zeit diese Leistungen in Anspruch nehmen und mit welchen zufälligen Schwankungen diese Zeiten einhergehen. Sofern es sich um Regelungen handelt, die der Anlagenpolitik im Sinne Swains (siehe /SWA 83/, S. J-23) handelt, wird ihre Zuverlässigkeit mit den dafür vorgesehenen Daten bewertet /SWA 83/, Tabelle 16-1 (1). Bei der Beordnung des erforderlichen Personals und der Beschaffung nötiger Ressourcen sieht die Methodik vor, Zeitaufwände und Zuverlässigkeiten wie in Tab. 4.1 und Tab. 4.2 beschrieben zu ermitteln. Umfassen die Aktivitäten, mit denen das Personal auf Veränderungen leistungsbestimmender Faktoren reagiert, ist wie in Tab. 4.5 vorgesehen zu verfahren.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich folgendes generisches Modell, mit dem leistungsbestimmende Faktoren und ihrer Wechselwirkungen mit dem Handeln in einer MCDET-basierten probabilistischen Sicherheitsanalyse erfasst werden können:

- Für jede Aktion bzw. Aktivität (wie z. B. die Diagnose) im Handlungsablauf sind die leistungsbestimmenden Faktoren zu ermitteln und in Bezug auf die Möglichkeit zu beurteilen, dass sie zur Unterlassung oder fehlerhaften Ausführung der betrachteten Aktion bzw. Aktivität führen. Der Methodenanwender kann wie in einer nicht-dynamischen probabilistischen Sicherheitsanalyse bei mehr oder minder vielen Aktionen oder Aktivitäten aufgrund der Informationen v. a. aus der Anlagenbegehung zu der begründeten Beurteilung kommen, dass er Fehlermöglichkeiten ausschließen darf.

Man denke beispielsweise an das Ablesen von Grenzwerten, auf deren Erfüllung das Personal mit gespannter Aufmerksamkeit wartet, um eine erforderliche Prozedur in einer Situation einleiten zu können, die sich durch hohen Stress auszeichnet. In solchen Fällen kann es trotz des erhöhten, fehlerförderlichen Stressniveaus unplausibel sein, dass diese Anzeige übersehen oder falsch abgelesen wird. Dem Methodenanwender wird empfohlen, nachvollziehbar zu dokumentieren, (1) welche Fehlermöglichkeiten er bei welchen Aktionen bzw. Aktivitäten aufgrund welcher leistungsbestimmenden Faktoren unterstellt und (2) welche Fehlermöglichkeiten er bei bestimmten Aktionen bzw. Aktivitäten ausschließt, auch wenn leistungsbestimmende Faktoren fehlerförderlicher Art vorliegen. Fallen Aktionen bzw. Aktivitäten nach den Informationen, vor allem aus der Anlagenbegehung, in keine dieser beiden Kategorien, kann der Methodenanwender, statt für jede dieser Aktionen bzw. Aktivitäten die leistungsbestimmenden Faktoren einzeln aufzuführen, die Art dieser Aktionen, Aktivitäten und die zugehörigen leistungsbestimmenden Faktoren zusammenfassend beschreiben und begründen, warum er bei diesen Aktionen bzw. Aktivitäten keine Fehler unterstellt hat. Diese Form der Beschreibung vermindert den Umfang der Dokumentation des Handlungsablaufs.

- Zeigt die Anlagenbegehung, dass das Personal bestimmte leistungsbestimmende Faktoren im Ereignisablauf aktiv verändert, sind diese auf leistungsbestimmende Faktoren bezogenen Aktionen und Aktivitäten so genau zu modellieren, wie es mit den vorliegenden Informationen möglich ist. Zu diesem Teil der Modellierung gehören zum einen die Beordnung erforderlichen Personals und benötigter Ressourcen (siehe Tab. 4.1 und Tab. 4.2). Zum anderen können Entscheidungen anfallen (vgl. Tab. 4.3 und Tab. 4.4), welche Alternativen zu wählen sind, wenn beispielsweise Zufahrtswege zu bestimmten Einsatzorten blockiert sein sollten.

Ein schädlicher Eingriff (siehe Tab. 4.3 und Tab. 4.4) kann Ursache für das Entstehen eines fehlerförderlichen Faktors sein, der weitere Aktionen bzw. Aktivitäten beeinträchtigt. Man denke etwa an den zusätzlichen Stress, den der irreversible Verlust eines dringend benötigten Behälterinventars hervorrufen kann. Auch solche Effekte können mit der vorliegenden Methodik modelliert werden, indem der Methodenanwender für die beiden Fälle, dass der schädliche Eingriff vollzogen wird oder nicht, die leistungsbestimmenden Faktoren der nachfolgenden Aktionen in Abhängigkeit von Ausführung oder Nichtausführung des schädlichen Eingriffs unterschiedlich modelliert.

Die vorliegende Methodik unterstützt somit sowohl die Erfassung und Beurteilung der im Handlungsablauf gegebenen, für die einzelnen Aktionen und Aktivitäten spezifischen, leistungsbestimmenden Faktoren als auch Veränderungen dieser Faktoren, die sich aus Aktionen des Personals ergeben.

5 Exemplarische Anwendung der Methodik im Rahmen einer dynamischen Analyse menschlicher Handlungen bei übergreifenden Einwirkungen

Unfallabläufe, die sich durch übergreifende Einwirkungen in Kernkraftwerken ergeben können, sind durch komplexe Wechselwirkungen zwischen dem Anlagenpersonal, System- und Prozessverhalten sowie stochastischen Einflüssen (aleatorische Unsicherheiten) im zeitlichen Ablauf gekennzeichnet. So können bestimmte Prozesszustände Aktionen des Personals hervorrufen, wobei gewisse Handlungen des Personals wiederum unmittelbaren Einfluss auf System- bzw. Komponentenzustände und damit auf den weiteren Prozessablauf haben können. Außerdem kann der Zeitpunkt, wann eine Handlung durchgeführt wird, einen wesentlichen Einfluss auf die weitere Prozessentwicklung haben. Je nachdem, ob eine notwendige Handlung schnell oder erst nach einer längeren Verzögerungszeit ausgeführt wird, können sich erhebliche Unterschiede im Unfallablauf ergeben, die sich wiederum unterschiedlich stark auf die Stressentwicklung der beteiligten Personen auswirken können.

In Abschnitt 5.1 werden relevante Abhängigkeiten und Wechselwirkungen beschrieben, die in einer menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden müssen, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeitsbewertung haben können. Die Methodik, die zur Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten angewendet werden kann, wird in Abschnitt 5.2 erläutert.

Wie solche Abhängigkeiten, inklusive der Stressentwicklung, in einer dynamischen Analyse menschlicher Handlungen modelliert werden können, wird in Abschnitt 5.3 anhand des Beispiels einer Brandbekämpfungsmaßnahme beschrieben. Die Modellierung und Analyse des Anwendungsbeispiels erfolgt dabei über die Methodik des Crew-Moduls in Verbindung mit MCDET.

In Abschnitt 5.4 werden einige Ergebnisse der Analyse beispielhaft dargestellt und diskutiert.

5.1 Relevante Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in einer menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse

Menschliche Handlungsabläufe sind durch eine Vielzahl von Abhängigkeiten, Unsicherheiten und Wechselwirkungen charakterisiert, die mit den Methoden der klassischen Zuverlässigkeitsanalyse menschlicher Handlungen nicht hinreichend genau berücksichtigt werden können. Da solche Abhängigkeiten und Wechselwirkungen einen erheblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit eines Handlungsablaufs haben können, sollten fortschrittliche Methoden eingesetzt werden, um sie in einer menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse möglichst umfassend modellieren und analysieren zu können.

Zur Veranschaulichung werden im Folgenden einige einfache Beispiele solcher Abhängigkeiten und Wechselwirkungen beschrieben, die bei der Analyse menschlicher Handlungen zu berücksichtigen sind.

5.1.1 Abhängigkeit der Zuverlässigkeit einer menschlichen Handlung von zeitlichen Einflüssen

Zeitliche Wechselwirkungen und zufällige Einflüsse (aleatorische Unsicherheiten) sind Faktoren, die einen Handlungsablauf und den Erfolg einer Handlung maßgeblich beeinflussen können. Die Zeiten, die zur Ausführung von Handlungen benötigt werden, können aus unterschiedlichen Gründen mehr oder weniger stark variieren. Deshalb sind auch die Ausführungszeiten relevanter Handlungen, die eine Änderung von Systemzuständen zur Folge haben (z. B. Abschalten einer Pumpe, Öffnen eines Ventils etc.), mit Unsicherheiten verbunden. Die Unsicherheiten der Ausführungszeiten von Handlungen können einen signifikanten Einfluss auf das System- und Prozessverhalten sowie auf die Zuverlässigkeit einer menschlichen Handlungsmaßnahme (z. B. Notfallprozedur) haben.

Die Zuverlässigkeit einer menschlichen Handlung hängt somit nicht nur davon ab, dass die Handlung richtig ausgeführt wird, sondern auch vom Zeitpunkt, wann die Handlung durchgeführt wird. D. h., auch wenn eine Handlung korrekt ausgeführt wird, kann sie dennoch erfolglos bleiben, wenn die Handlung zu spät erfolgt. Ob eine Handlung zu spät ausgeführt wird oder nicht, hängt davon ab, ob die Ausführungszeit der Handlung einen kritischen Zeitpunkt t_{crit} überschreitet (oder nicht). Der kritischen Zeitpunkt t_{crit} hängt von der Prozessentwicklung ab und definiert den Zeitpunkt, zu dem der Prozess einen unerwünschten Zustand erreicht hat, der durch die Handlungsmaßnahme eigentlich vermieden werden sollte.

Welchen Einfluss die Ausführungszeit einer menschlichen Handlung auf die Zuverlässigkeit der Handlung hat, soll an einem einfachen Beispiel demonstriert werden. Als Beispiel soll eine einfache Handlung dienen, bei der ein Ventil manuell geöffnet werden muss, um beispielsweise Druck aus einem Behälter abzulassen. Das Diagramm in Abb. 5.1 skizziert, wie die Zuverlässigkeit der Handlung bei ausschließlicher Berücksichtigung des menschlichen Fehlers prinzipiell ermittelt wird.

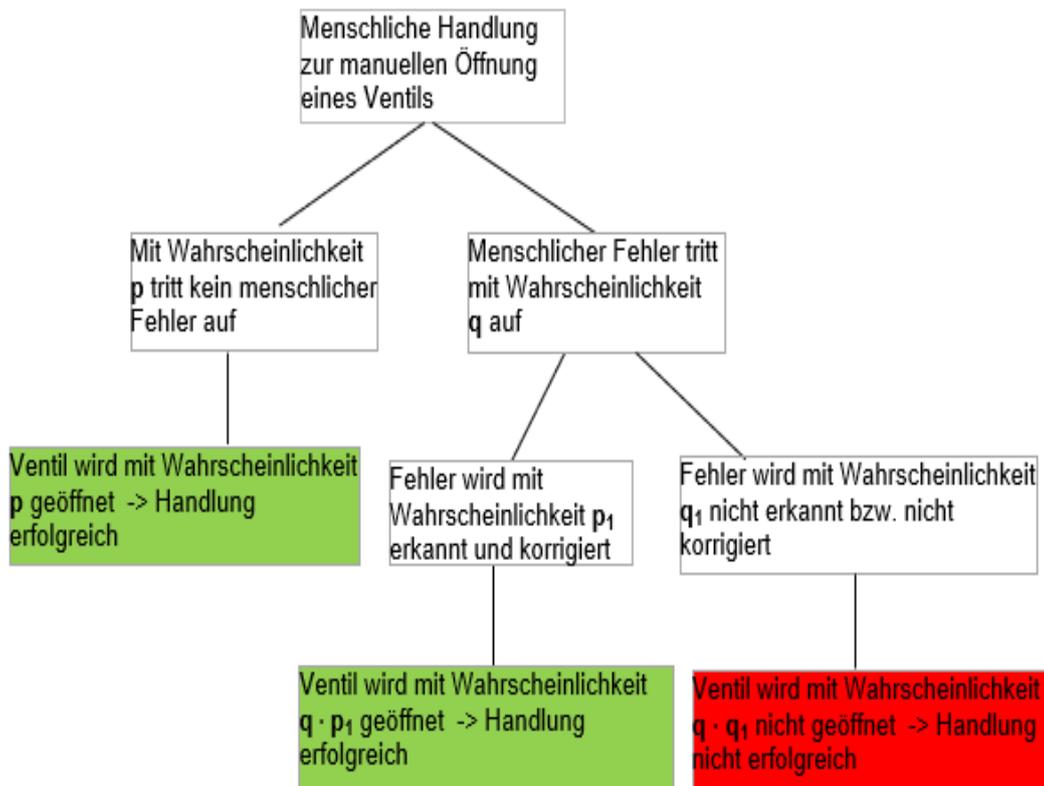


Abb. 5.1 Zuverlässigkeit einer Handlung bei ausschließlicher Berücksichtigung menschlicher Fehler

In Abb. 5.1 bezeichnet p die Wahrscheinlichkeit, dass bzgl. der Handlung kein Fehler unterläuft und die Handlung erfolgreich durchgeführt wird. Mit Wahrscheinlichkeit q tritt im Rahmen der Handlung ein Fehler auf. Dieser Fehler kann z. B. darin bestehen, dass die Ausführung der Handlung unterlassen wird (Auslassungsfehler – error of omission, EOO) oder falsch ausgeführt wird (Ausführungsfehler – error of commission, EOC).

Wenn ein Fehler auftritt, kann dieser mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit p_1 erkannt und behoben werden. Obwohl ein Fehler aufgetreten ist, wird in diesem Fall die Hand-

lung durch Erkennen und Korrektur des Fehlers mit der Wahrscheinlichkeit $q \cdot p_1$ erfolgreich ausgeführt und das Ventil geöffnet.

Mit der Wahrscheinlichkeit $q_1 = 1 - p_1$ wird der Fehler entweder nicht erkannt oder kann nicht korrigiert werden. Mit der Wahrscheinlichkeit $q \cdot q_1$ wird das Ventil nicht manuell geöffnet, womit die Handlung als nicht erfolgreich bewertet wird.

In dem in Abb. 5.1 dargestellten Beispiel ergibt sich die Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen Ausführung der Handlung aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten, dass die Handlung ohne Fehler durchgeführt wird oder, dass ein menschlicher Fehler auftritt, dieser aber im nachfolgenden Ablauf erkannt und korrigiert wird. D. h.,

$$\begin{aligned} P(\text{Maßnahme erfolgreich}) &= P(\text{kein menschlicher Fehler}) \\ &+ P(\text{menschlicher Fehler}) \cdot P(\text{Fehler wird erkannt und korrigiert}) \\ &= p + q \cdot p_1 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Handlung nicht erfolgreich ist, ergibt sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeit, dass ein menschlicher Fehler auftritt und dieser im nachfolgenden Ablauf nicht erkannt bzw. nicht korrigiert wird, d. h.

$$\begin{aligned} P(\text{Maßnahme nicht erfolgreich}) &= \\ &P(\text{menschlicher Fehler}) \cdot P(\text{Fehler wird nicht erkannt}) = q \cdot q_1 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Die Ablaufstruktur, die sich bzgl. der Zuverlässigkeitsbestimmung ergibt, wenn neben dem menschlichen Fehler auch der Zeitfaktor berücksichtigt wird, ist in Abb. 5.2 skizziert.

Dabei beschreiben t und t_1 die Zeitpunkte, wann die Handlung bzgl. der jeweiligen Sequenzen ausgeführt wurde und t_{crit} einen kritischen Zeitpunkt, bei dessen Überschreiten die Maßnahme als nicht erfolgreich betrachtet wird. Erfolgt die Durchführung der Handlung vor dem Zeitpunkt t_{crit} , entwickelt sich der Prozess im weiteren Verlauf in einen unkritischen Zustand, so dass die Maßnahme als erfolgreich betrachtet werden kann. Erfolgt die Handlungsausführung nach t_{crit} , befindet sich der Prozess in einem unerwünschten Zustand, der durch die Handlung eigentlich vermieden werden sollte. In diesem Fall wird die Handlung als nicht erfolgreich bewertet.

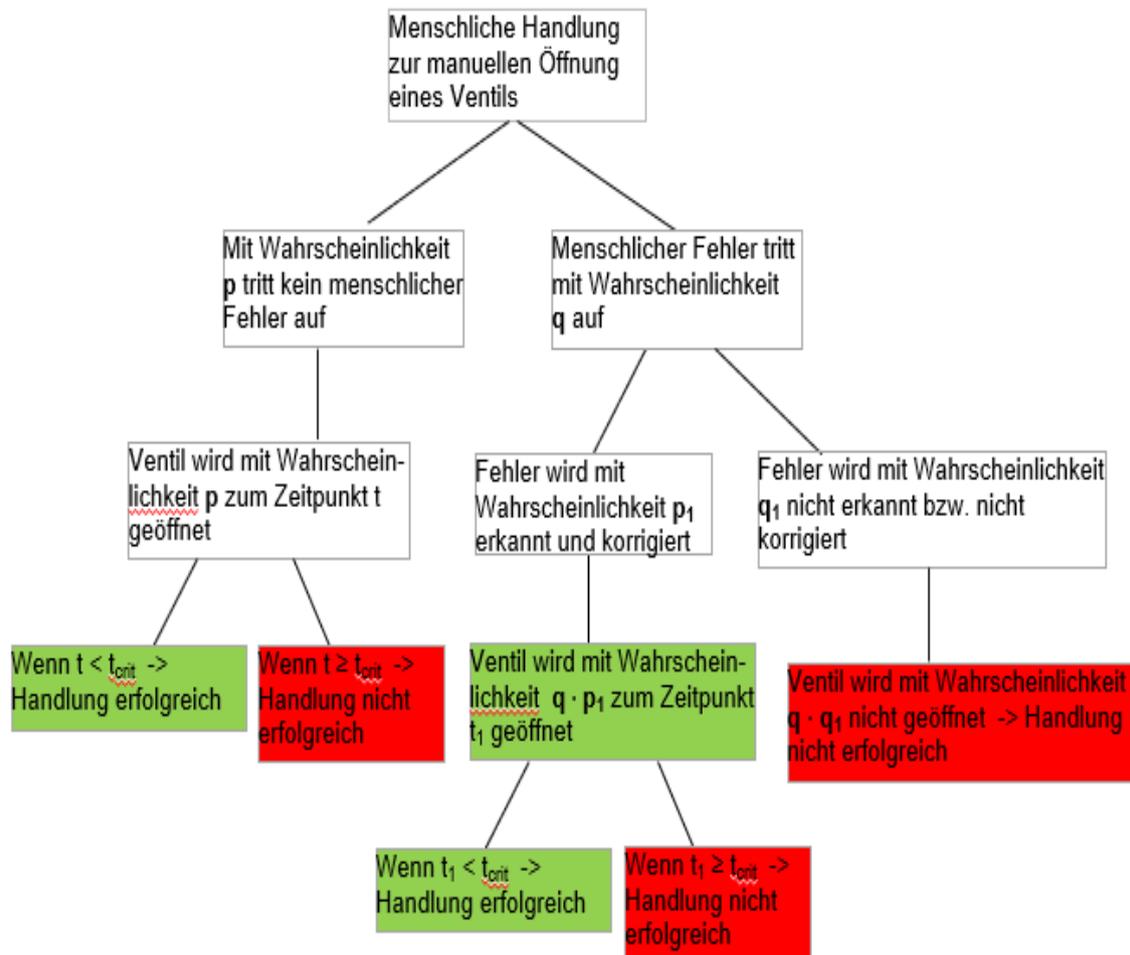


Abb. 5.2 Zuverlässigkeitsbestimmung einer Handlung unter Berücksichtigung menschlicher Fehler und des zeitlichen Einflusses

Wenn in Abb. 5.2 die Zeitpunkte t und t_1 als Zufallsgrößen betrachtet werden, deren Unsicherheiten jeweils durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben wird, so können unter der Voraussetzung, dass t_{crit} bekannt ist, die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten $P(t < t_{crit})$ und $P(t_1 < t_{crit})$ bzw. $P(t \geq t_{crit})$ und $P(t_1 \geq t_{crit})$ berechnet werden.

Die erfolgreiche Durchführung der Handlung setzt sich aus den Ereignissen zusammen, dass entweder:

- die Handlung ohne Fehler und vor dem Zeitpunkt t_{crit} ausgeführt wird oder
- ein menschlicher Fehler bei der Handlung erfolgt, dieser erkannt und vor dem kritischen Zeitpunkt t_{crit} korrigiert wird.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Handlung erfolgreich ausgeführt wird, ergibt sich somit aus Gleichung (5.3):

$$P(\text{Handlung erfolgreich}) = p \cdot P(t < t_{\text{crit}}) + q \cdot p_1 \cdot P(t_1 < t_{\text{crit}}) \quad (5.3)$$

Die nicht erfolgreiche Durchführung der Handlung setzt sich aus den folgenden Ereignissen zusammen:

- Fehler bei der Durchführung der Handlung, der nicht erkannt wird oder
- Handlung wird zwar ohne Fehler aber erst nach t_{crit} ausgeführt oder
- Fehler bei der Durchführung wird zwar erkannt, aber erst nach t_{crit} behoben.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Handlung nicht erfolgreich ausgeführt wird, ergibt sich aus Gleichung (5.4):

$$P(\text{Handlung nicht erfolgreich}) = q \cdot q_1 + p \cdot P(t \geq t_{\text{crit}}) + q \cdot p_1 \cdot P(t_1 \geq t_{\text{crit}}) \quad (5.4)$$

Vergleicht man die Zuverlässigkeit der Handlung ohne und mit Berücksichtigung der Ausführungszeiten der Gleichungen (5.1) und (5.3), so gilt:

$$p + q \cdot p_1 \geq p \cdot P(t < t_{\text{crit}}) + q \cdot p_1 \cdot P(t_1 < t_{\text{crit}}) \quad (5.5)$$

Die Gleichheitsbeziehung in Gleichung (5.5) gilt nur in den Fällen, in denen $P(t < t_{\text{crit}}) = 1$ und $P(t_1 < t_{\text{crit}}) = 1$ gilt.

Gilt $P(t < t_{\text{crit}}) < 1$ oder $P(t_1 < t_{\text{crit}}) < 1$, so ergibt sich:

$$p > p \cdot P(t < t_{\text{crit}}) \text{ bzw. } q \cdot p_1 > q \cdot p_1 \cdot P(t_1 < t_{\text{crit}}),$$

woraus sich die Ungleichheitsbeziehung in Gleichung (5.5) ergibt.

Gleichung (5.5) zeigt somit, dass in den Fällen, in denen $P(t < t_{\text{crit}}) < 1$ oder $P(t_1 < t_{\text{crit}}) < 1$ gilt, die Zuverlässigkeit einer menschlichen Handlung systematisch überschätzt wird,

wenn entsprechende Zeitabhängigkeiten in der menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse nicht berücksichtigt werden.

Beim Vergleich der Gleichungen (5.2) und (5.4), in denen die Wahrscheinlichkeit berechnet wird, dass die Handlung nicht erfolgreich durchgeführt wird, ergibt sich zwischen den Bewertungen ohne und mit Berücksichtigung der Zeitabhängigkeiten folgende Beziehung:

$$q \cdot q_1 \leq q \cdot q_1 + p \cdot P(t \geq t_{\text{crit}}) + q \cdot p_1 \cdot P(t_1 \geq t_{\text{crit}}) \quad (5.6)$$

Die Gleichheit der Wahrscheinlichkeiten in Gleichung (5.6) ist nur dann gegeben, wenn $P(t \geq t_{\text{crit}}) = 0$ und $P(t_1 \geq t_{\text{crit}}) = 0$ ist.

In den Fällen, in denen $P(t \geq t_{\text{crit}}) > 0$ oder $P(t_1 \geq t_{\text{crit}}) > 0$ gilt, wird die Wahrscheinlichkeit, dass die Handlung nicht erfolgreich durchgeführt wird, systematisch unterschätzt, wenn entsprechende Zeitabhängigkeiten nicht berücksichtigt werden.

Mit den obigen Ausführungen wurde gezeigt, dass die Zuverlässigkeitsbewertung einer menschlichen Handlung zu optimistisch ausfallen kann, wenn die Ausführungszeiten der Handlungen nicht in der Analyse berücksichtigt werden. Außerdem kann nicht eingeschätzt werden, ob und in welchem Ausmaß die Zuverlässigkeit überschätzt wird. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass sowohl menschliche Fehler als auch die Ausführungszeiten der menschlichen Handlung relevante Faktoren sind, die Einfluss auf die Zuverlässigkeit einer Handlung haben und deshalb gleichermaßen in der Zuverlässigkeitsanalyse menschlicher Handlungen zu berücksichtigen sind.

Manche Handlungen, die im Rahmen eines Handlungsablaufs durchgeführt werden, haben einen unmittelbaren Einfluss auf den Zustand von Systemkomponenten und damit auf die weitere Prozessentwicklung. Je nachdem, ob eine Handlung schnell oder erst nach einer längeren Verzögerungszeit durchgeführt wird, können sich erhebliche Unterschiede im Unfallablauf ergeben. Um den Einfluss des Zeitpunkts einer Handlungsausführung (z. B. Öffnen eines Ventils) auf den Prozessablauf zu quantifizieren, müssen zunächst die Unsicherheiten quantifiziert werden, wann die entsprechende Handlung ausgeführt wird.

Wenn diese Unsicherheiten als aleatorische Unsicherheiten in die Berechnung des Prozessablaufs eingehen, können Aussagen abgeleitet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Maßnahme rechtzeitig durchgeführt wird, um den beabsichtigten Erfolg zu erzielen, bzw. mit welcher Wahrscheinlichkeit die Handlung so spät erfolgt, so dass die Handlung den beabsichtigten Zweck nicht oder nur zum Teil erfüllt. Damit lassen sich dann auch die Wahrscheinlichkeiten $P(t < t_{crit})$ und $P(t \geq t_{crit})$ ermitteln, die zur Zuverlässigkeitsschätzung einer menschlichen Handlung benötigt werden.

Um den zeitlichen Einfluss in der menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigen zu können, besteht eine wesentliche Aufgabe somit darin, die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zeiten zu schätzen, wann relevante Handlungen im Rahmen eines Handlungsablaufs durchgeführt werden, die einen Einfluss auf einen Unfallablauf haben können. In der GRS wurde mit dem Crew-Modul /PES 06/ eine Methode entwickelt, mit der zeitliche Einflüsse bei den Handlungsausführungen berücksichtigt und damit Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Ausführungszeiten relevanter Handlungen ermittelt werden können.

5.1.2 Abhängigkeit menschlicher Handlungen vom Systemzustand

Menschliche Handlungen beeinflussen nicht nur den System- und Prozesszustand eines Unfallablaufs. Menschliche Handlungsabläufe können auch durch den System- bzw. Prozesszustand beeinflusst werden, der bestimmte Handlungsausführungen erfordert.

Zur Veranschaulichung soll folgendes Beispiel der in Abschnitt 5.2 modellierten Brandbekämpfungsmaßnahme dienen. Im Rahmen der Brandbekämpfungsmaßnahme wird der Brandläufer (BL) vom Schichtleiter (SL) angewiesen, sich zum Brandraum zu begeben, um dort ggf. einen Löschversuch zu unternehmen. Wenn der Brandläufer den Brandraum erreicht, können sich in Abhängigkeit vom Prozesszustand verschiedene Handlungsabläufe ergeben, die in Abb. 5.3 skizziert sind. Die blauen Rechtecke in Abb. 5.3 beziehen sich auf den Prozesszustand, die weißen auf die Handlungen des Brandläufers.

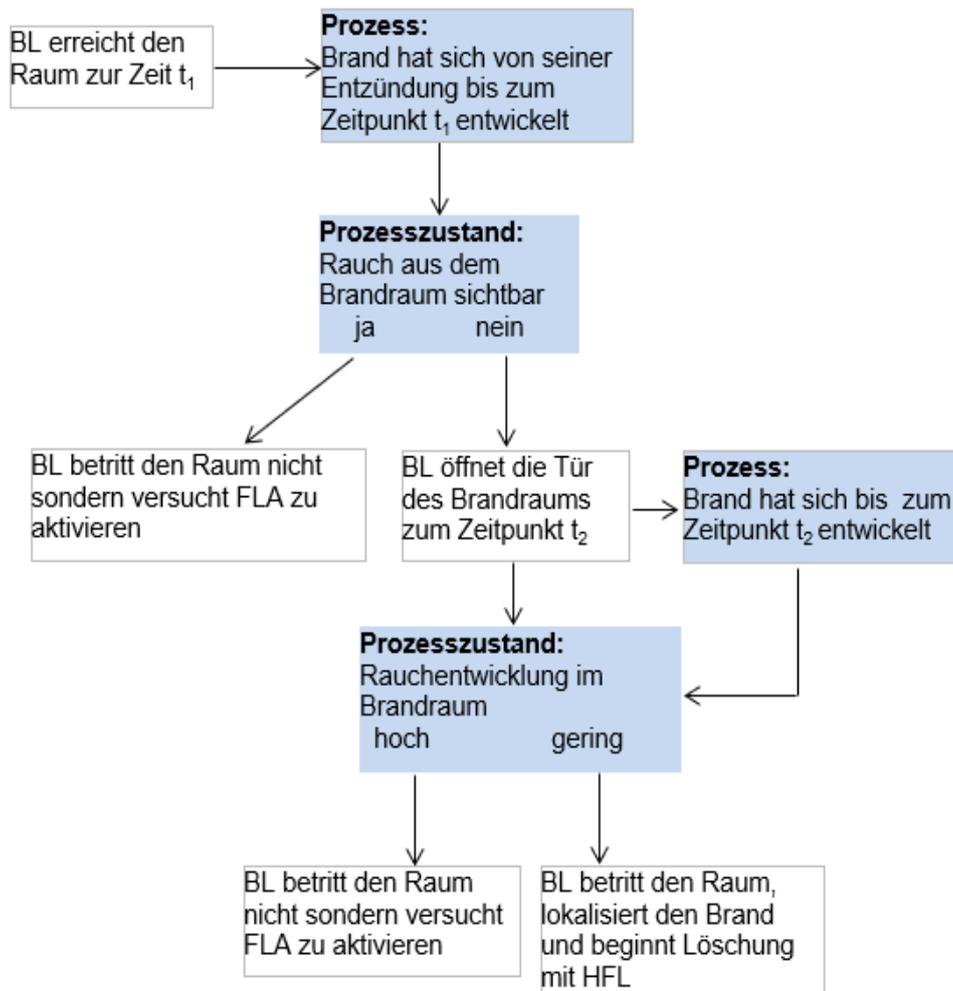


Abb. 5.3 Abhängigkeit menschlicher Handlungen vom Prozesszustand

Der skizzierte Ablauf in Abb. 5.3 beschreibt folgende Situation: Der Brandläufer, der vom Schichtleiter angewiesen wurde, sich zu Brandraum zu begeben, erreicht den Raum zu einem Zeitpunkt t_1 nach der Brandentstehung. Der Zeitpunkt, wann der Brandläufer den Brandraum erreicht ist wichtig, da sich der Brand von seiner Entzündung bis zum Zeitpunkt t_1 entwickelt. Erreicht der Brandläufer den Brandraum zu einem relativ frühen Zeitpunkt, kann die Situation vorliegen, dass der Brand noch nicht sehr weit fortgeschritten ist und die Rauchentwicklung bis dahin relativ wenig fortgeschritten ist. Kommt der Brandläufer zu einem späteren Zeitpunkt am Brandraum an, kann sich die Situation schon ganz anders darstellen, so dass er mit einer erheblichen Rauchentwicklung konfrontiert ist. In diesem Zusammenhang ist es für eine Analyse wichtig, die Unsicherheiten der Zeit, wann der Brandläufer den Brandraum erreicht, zu berücksichtigen. Durch die zeitlichen Variationen (Unsicherheiten) können sich unterschiedliche Prozesszustände ergeben, die verschiedene Handlungsabläufe verursachen.

Wenn der Brandläufer den Raum zum Zeitpunkt t_1 erreicht, hängen seine weiteren Aktionen davon ab, ob vor dem Brandraum eine Rauchentwicklung sichtbar ist oder nicht.

- Wenn bereits Rauch aus dem Brandraum austritt, wird der Brandläufer aus Sicherheitsgründen die Tür des Brandraums nicht öffnen. Er wird stattdessen versuchen, die im Raum installierte stationäre Feuerlöschanlage (FLA), deren Auslösung per Knopfdruck (vor Ort, außerhalb des Brandraums) in der vorliegenden Betrachtung als ausgefallen angenommen wird, manuell zu aktivieren. Die Schaltstelle, um das Ventil zu betätigen, liegt auf der gegenüberliegenden Seite des Brandraums. Deshalb wird sich der Brandläufer in dieser Situation zur Schaltstelle des Ventils begeben, um das Ventil manuell zu öffnen.
- Wenn keine Rauchentwicklung aus dem Raum sichtbar ist, wird der Brandläufer versuchen, die Tür des Brandraums vorsichtig zu öffnen, um den Zustand der Brandentwicklung im Raum abzuschätzen. Auch an dieser Stelle hängt der weitere Handlungsablauf davon ab, wie weit die Rauch- und Temperaturentwicklung im Raum fortgeschritten ist.
- Wenn die Rauch- und Temperaturentwicklung im Raum soweit fortgeschritten ist, dass ein Betreten des Raumes nicht gefahrlos möglich ist, wird der Brandläufer versuchen, die Feuerlöschanlage manuell zu aktivieren.
- Wenn sich Rauch und Temperatur im Raum noch nicht so weit entwickelt haben, dass ein Betreten des Raumes möglich ist, wird der Brandläufer den nächst gelegenen Handfeuerlöscher (HFL) ergreifen, den Raum betreten, versuchen den Brandherd zu lokalisieren und einen Löschversuch mit dem Handfeuerlöscher zu beginnen.

Dieses einfache Beispiel soll zeigen, wie Handlungsabläufe von Prozesszuständen abhängen können. In diesem Beispiel ist der Prozesszustand durch die Rauchentwicklung innerhalb und außerhalb des Brandraums gegeben. Die Rauchentwicklung des unterstellten Brandszenarios könnte hier durch einen deterministischen Reencode ermittelt werden, mit dem der Brand simuliert werden kann.

Wie oben bereits erwähnt, hängt der Prozesszustand (hier: Rauchentwicklung) davon ab, wann der Brandläufer den Brandraum erreicht. Der Zeitpunkt t_1 , zu welchem er den Brandraum erreicht, stellt eine Zufallsgröße dar. Die aleatorische Unsicherheit von t_1 resultiert aus den vorhergehenden Handlungen der bei der Brandbekämpfung beteiligten

Personen sowie von zufälligen Einflüssen, die die auszuführenden Handlungsabläufe beeinflussen können.

Die zwischen menschlichen Handlungen und Prozesszuständen auftretende Wechselwirkung, wird grob durch das in Abb. 5.4 dargestellte Diagramm skizziert:

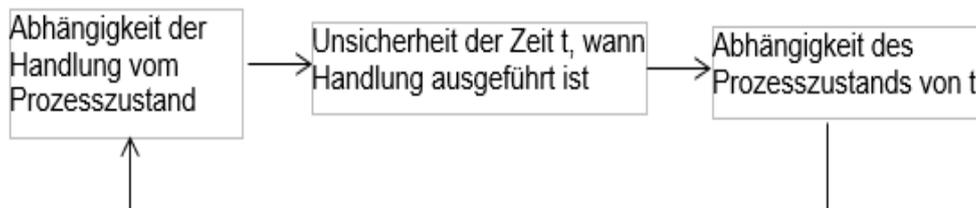


Abb. 5.4 Wechselwirkung zwischen Handlungsablauf und Prozesszustand

Aus dem Diagramm in Abb. 5.4 ist zu erkennen, dass die Quantifizierung der Unsicherheit der Zeit t , wann eine Handlung ausgeführt ist, ein grundlegender Baustein zur Modellierung solcher Wechselwirkungen ist. Mit dem in der GRS entwickelten Crew-Modul /PES 06/ können über Simulationen der modellierten Handlungsabläufe die Unsicherheiten der Ausführungszeiten von relevanten Handlungen quantifiziert werden, die unmittelbaren Einfluss auf die Prozessentwicklung haben. Diese können dann als aleatorische Unsicherheit in eine deterministische Analyse eingebunden werden, um ihren Einfluss auf Prozesszustand ermitteln zu können.

5.1.3 Abhängigkeit menschlicher Handlungen von zufälligen Einflüssen

Um die Abhängigkeit menschlicher Handlungsabläufe von zufälligen Ereignissen (aleatorische Unsicherheit) zu demonstrieren, wird das Beispiel in Abb. 5.3 zugrunde gelegt. Es wird von der Situation ausgegangen, dass der Brandläufer eine so starke Rauchentwicklung im Brandraum feststellt, dass er den Raum aus Sicherheitsgründen nicht betreten kann. Vielmehr wird er versuchen, die Feuerlöschanlage zu aktivieren. Der Ablauf, der von einer Zufallsgröße abhängt, wird in Abb. 5.5 skizziert.

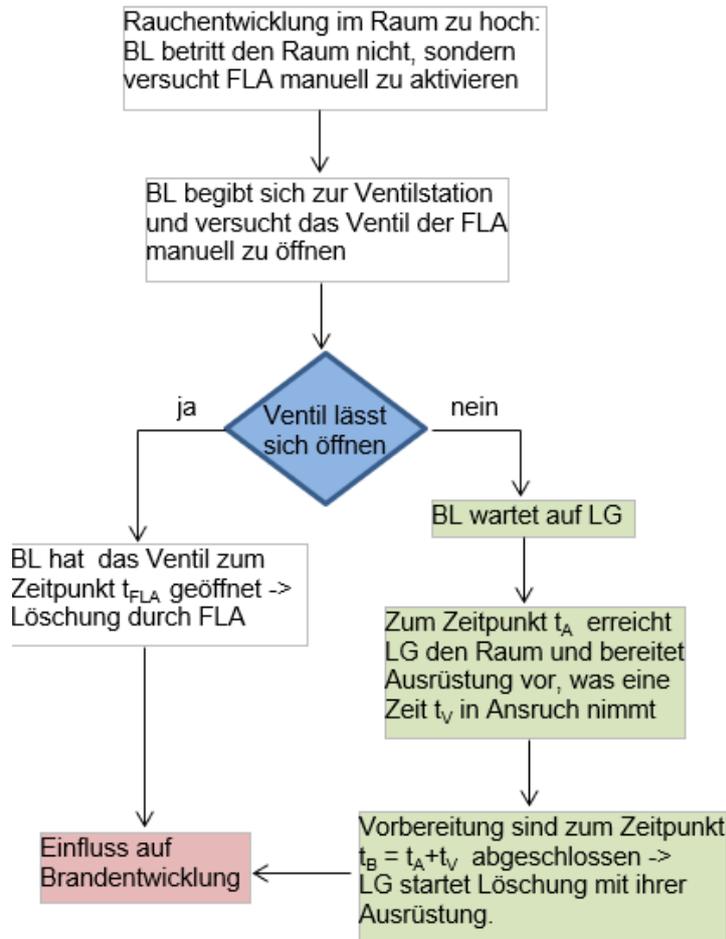


Abb. 5.5 Abhängigkeit des Handlungsablaufs von aleatorischen Unsicherheiten

Aufgrund der Rauchentwicklung wird der Brandläufer versuchen, die Feuerlöschanlage zu aktivieren. Da angenommen wurde, dass die direkte Auslösung der Löschanlage (manuell per Knopfdruck vor Ort) ausgefallen ist, muss er sich zur Ventilstation der Feuerlöschanlage begeben, Wenn der Brandläufer die Ventilstation erreicht, versucht er das Ventil zur Aktivierung der Feuerlöschanlage manuell zu öffnen. In Abb. 5.5 werden die unterschiedlichen Handlungsabläufe beschrieben, die von dem zufälligen Ereignis abhängen, ob sich das Ventil manuell öffnen lässt oder nicht.

- Wenn sich das Ventil öffnen lässt - dies erfolgt zu einem Zeitpunkt t_{FLA} , wird die Feuerlöschanlage aktiviert und die Löschung des Brandes beginnt.
- Wenn das Ventil zufällig zu stark verriegelt ist und der Brandläufer nicht in der Lage ist, das Ventil manuell aufzufahren, wird sich der Brandläufer zurück zum Eingang des Brandraums begeben, um dort auf die Löschanlage (LG) zu warten. Sobald diese eintrifft (dies erfolgt zu einem Zeitpunkt t_A), wird der Brandläufer die Löschanlage

gruppe über die vorliegende Situation (Verrauchung im Brandraum und Feuerlöschanlage nicht verfügbar) informieren. Daraufhin werden die Personen der Löschruppe beginnen, ihr Löschgerät vorzubereiten (z. B. Auslegen des Schlauches, Anschluss des Schlauches an Wasserhydranten). Für die Vorbereitungsarbeiten der Löschruppe wird eine gewisse Zeit t_V benötigt. Nach Beendigung der Vorbereitungsarbeiten beginnt zum Zeitpunkt $t_B = t_A + t_V$ die Löschung des Brandes durch die Löschruppe.

Ob sich das Ventil manuell öffnen lässt oder nicht, ist eine aleatorische Unsicherheit (zufälliges Ereignis), wobei das Ventil mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit p_δ geöffnet werden kann und sich mit der Wahrscheinlichkeit $1 - p_\delta$ nicht öffnen lässt. Die Wahrscheinlichkeit p_δ kann z. B. über Daten aus der Betriebserfahrung geschätzt werden.

Der maßgebliche Unterschied zwischen den beiden in Abb. 5.2 dargestellten Handlungssequenzen besteht darin, dass die Brandlöschung einerseits zu verschiedenen Zeitpunkten einsetzt und zum anderen die Löschung durch unterschiedliche technische Hilfsmittel erfolgt. Mit der Wahrscheinlichkeit p_δ erfolgt die Löschung über die Feuerlöschanlage im Brandraum, mit Wahrscheinlichkeit $1 - p_\delta$ erfolgt die Löschung durch die Löschruppe mit ihrer Löschausrüstung. Dies könnte Einfluss auf die Zeit haben, wie schnell der Brand gelöscht werden kann und auf den Zustand im Brandraum, der durch die unterschiedlichen Löschmittel verursacht wird.

Die Zeitpunkte t_{FLA} (manuelle Öffnung des Ventils), bzw. t_B (die Löschruppe beginnt, den Brand mit ihrer Ausrüstung zu löschen) sind mit Unsicherheiten verbunden, die einer gewissen Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen. Eine Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von t_{FLA} bzw. t_B kann über die Methodik des Crew-Moduls in Verbindung mit MCDET ermittelt werden.

5.1.4 Wechselwirkungen von Stress und menschlichen Handlungen bei übergreifenden Einwirkungen

Mit zunehmender Komplexität technischer Systeme, welche durch immer mehr Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen Komponenten und Teilsystemen charakterisiert sind, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Komplexität der Konsequenzen für die SSC einer Anlage durch übergreifende Einwirkungen erheblich sein kann. Die Schädigungen, die sich nach Auftreten von übergreifenden Einwirkungen ergeben, können durch kaskadierende Effekte sehr vielfältig und von unterschiedlichem

Ausmaß sein. Der Mensch mit seinen Entscheidungen und Handlungen stellt dabei oftmals die letzte Möglichkeit dar, die Konsequenzen solcher Gefahren zu beeinflussen.

Aufgrund der Vielfältigkeit und Unvorhersehbarkeit der Bedingungen, die nach übergreifenden Ereignissen in der Anlage auftreten, können die Handlungen, die das Personal durchführen muss, um die Anlage abzufahren und eine Freisetzung radioaktiven Materials zu verhindern, oftmals nicht durch regelbasierte Maßnahmen festgelegt werden. Vielmehr ist das Personal in solchen Fällen gezwungen, wissensbasierte Aktionen durchzuführen, die erhebliche kognitive Leistungen und Entscheidungen erfordert. Mit dem Auftreten übergreifender Einflüsse sind oftmals kaskadierende Effekte verbunden, die verschiedenartige Systemausfälle sowie Zerstörungen der Infrastruktur innerhalb und außerhalb der Anlage zur Folge haben können. Diese Situationen stellen eine extreme Belastung für das Personal dar, da sie ungewohnte und verschiedenartige Probleme in möglichst kurzer Zeit zu bewältigen haben.

Durch die ungewohnten und schwierigen Bedingungen, denen das Personal bei übergreifenden Einflüssen gegenüberstehen kann und welche es zu bewältigen hat, ist davon auszugehen, dass sich in solchen Fällen der Stresslevel des Personals so stark erhöhen kann, dass dadurch die Zuverlässigkeit der durchzuführenden menschlichen Handlungen beeinflusst werden kann. Die Abhängigkeitsstruktur zwischen übergreifenden Einflüssen und menschlicher Zuverlässigkeit ist in dem Diagramm in Abb. 5.6 grob skizziert.

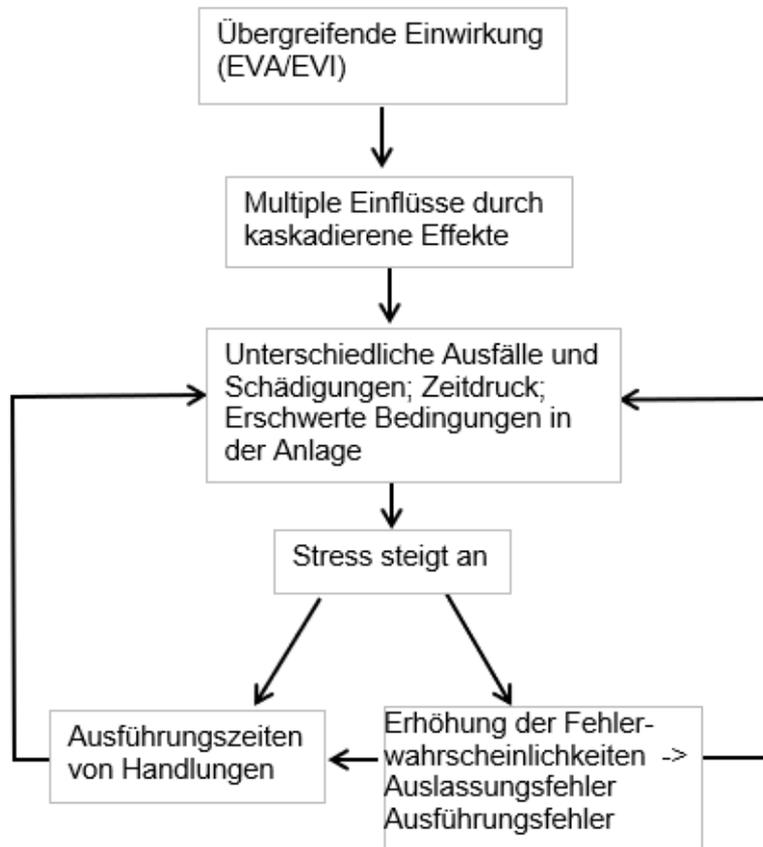


Abb. 5.6 Wechselwirkungen zwischen Ereignissen aus übergreifenden Einwirkungen und menschlichen Handlungen

Die in Abb. 5.6 dargestellte Skizze zeigt die gegenseitige Abhängigkeit, die zwischen einer auftretenden übergreifenden Einwirkung und menschlichen Handlungen bestehen kann. Das Auftreten einer übergreifenden Einwirkung wird je nach Schweregrad des Ereignisses mehr oder weniger starken Einfluss auf die Prozessentwicklung und auf die Bedingungen in der Anlage haben. Bei schweren Auswirkungen übergreifender Ereignisse können z. B. Gänge und Zufahrtswege nicht mehr passierbar sein, wodurch die Ausführung notwendiger Handlungen erheblich erschwert und verzögert wird. Diese ungewohnten Situationen und erschwerten Bedingungen in der Anlage können zu einer erheblichen Stressbelastung der beteiligten Personen führen. Eine zu hohe Stressbelastung erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Handlungsfehler in unterschiedlicher Form auftreten können. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt:

- Zu hohe Stressbelastung kann zu einer gedanklichen Blockade oder auch Überreizung führen, so dass die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, die Ausführung einer notwendigen Handlung zu vergessen.

- Durch die erschwerten Bedingungen kann sich eine stressbedingte Hektik ergeben, durch die eine Handlung vorschnell ausgeführt wird, die als Folge eine unerwünschte Auswirkung auf den Prozesszustand hat. Wird die unerwünschte Auswirkung erkannt, stellt dies eine zusätzliche Belastung dar, da unter dem bestehenden Zeitdruck die Handlung rückgängig zu machen ist und stattdessen andere Handlungsalternativen zu überlegen sind. Durch menschliche Fehler kann der Stress weiter erhöht werden, was sich wiederum ungünstig auf die nachfolgenden Handlungen auswirken kann.
- Wichtige Signale und Informationen werden mental nicht erfasst bzw. nicht richtig interpretiert, wodurch sich eine verzerrte oder falsche Einschätzung der vorliegenden Situation ergeben kann und deshalb die Notwendigkeit zur Ausführung einer Maßnahme nicht erkannt wird oder aufgrund der falschen Einschätzung nicht geeignete Handlungen ausgeführt werden.

Da ein Unfallablauf durch menschliche Handlungen günstigen oder auch ungünstigen Veränderungen im zeitlichen Ablauf unterworfen ist, die Einfluss auf den Stress von Personen haben können, ist auch die Stressentwicklung von Personen als eine dynamische Größe zu betrachten, die sich in Abhängigkeit vom Prozesszustand sowie System- und Umgebungsbedingungen im zeitlichen Ablauf einer Handlung verändern kann. So kann sich z. B. ein hoher Stresslevel, der sich bei erschwerten Bedingungen einstellt, auch wieder sinken, wenn das Personal eine schnelle Lösung des Problems gefunden hat und die entsprechenden Handlungen in hinreichend kurzer Zeit durchgeführt hat, so dass eine Entwicklung des Prozesses in die gewünschte Richtung erkennbar ist.

5.2 Methodik zur dynamischen Analyse

Um die komplexen Abhängigkeiten zwischen Prozessentwicklung, menschlichen Handlungen sowie den Einfluss stochastischer Ereignisse im zeitlichen Verlauf analysieren zu können, sind fortschrittliche Methoden zur Durchführung dynamischer probabilistischer Sicherheitsanalysen notwendig. Mit dieser Zielsetzung wurde in der GRS das Crew-Modul entwickelt, mit dem ein Handlungsablauf, der sich durch die arbeitsteilige Ausführung von Handlungen durch die Schichtmannschaft ergibt, als ein dynamischer Ablauf modelliert und simuliert werden kann. Um die Abhängigkeiten von Handlungsabläufen von stochastischen Einflussgrößen berücksichtigen zu können, wird das Crew-Modul in Verbindung mit der in der GRS entwickelten Methode MCDET (Monte Carlo Dynamic Event

Tree) eingesetzt. Das Analysewerkzeug MCDET kann in Kombination mit einem deterministischen Rechencode zur Durchführung einer integralen deterministisch-probabilistischen Sicherheitsanalyse (IDPSA) angewendet werden. Im Rahmen einer IDPSA können stochastische Einflussgrößen detailliert und umfassend modelliert und deren Einflüsse auf den Prozessablauf realitätsnah berücksichtigt werden. Die Methoden zur Quantifizierung menschlicher Fehler, die bisher überwiegend für die klassische PSA entwickelt wurden, müssen entsprechend weiterentwickelt werden, um in eine IDPSA eingebunden werden zu können.

Im Gegensatz zur Modellierung physikalischer Prozesse, die durch Gesetzmäßigkeiten und mathematische Gleichungen definiert werden, können menschliche Handlungsabläufe und Entscheidungsprozesse, die ein bestimmtes Ziel verfolgen, im Allgemeinen nicht über mathematische Gleichungen beschrieben werden. Aus diesem Grund ist man gezwungen, dass mögliche Handlungsabläufe, die sich in Abhängigkeit stochastischer Einflussgrößen oder aus bestimmten System- und Prozesszuständen ergeben können, antizipiert und explizit beschrieben werden müssen.

Deshalb sieht das grundlegende Konzept des Crew-Moduls vor, einen komplexeren Handlungsablauf, bei dem eine oder mehrere Personen beteiligt sind und interagieren können, durch eine Vielzahl von einfachen Einzelhandlungen zu beschreiben. D. h., das Konzept des Crew-Moduls zur Simulation von Handlungsabläufen als dynamischer Prozess besteht im Wesentlichen darin, einen menschlichen Handlungsablauf in mehr oder weniger kleine, weniger komplexe Einzelhandlungen (Basishandlungen) zu zerlegen. Je feiner die Zerlegung in Basishandlungen erfolgt, desto detaillierter kann der Handlungsablauf der zu bewertenden Maßnahme simuliert und bewertet werden. Der Grad, wie fein die Maßnahme in Basishandlungen zerlegt wird, steht im Ermessen des Benutzers. Eine ausführlichere Beschreibung des Crew-Moduls ist in /PES 06/ und /PES 14/ gegeben.

Auf die Motivation und auf das Konzept des Crew-Moduls wurde bereits kurz in Abschnitt 4.1.1 eingegangen.

5.3 Beschreibung und Modellierung des Anwendungsfalls

Zur Veranschaulichung soll eine Zerlegung eines Handlungsablaufs in Basishandlungen am Beispiel einer Brandbekämpfungsmaßnahme demonstriert werden. Es wird von der

Situation ausgegangen, dass in einem Raum ein Brand ausgebrochen ist. Weiter wird für das Demonstrationsbeispiel angenommen, dass die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert, d. h. Signale von mindestens zwei Brandmeldern. 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).

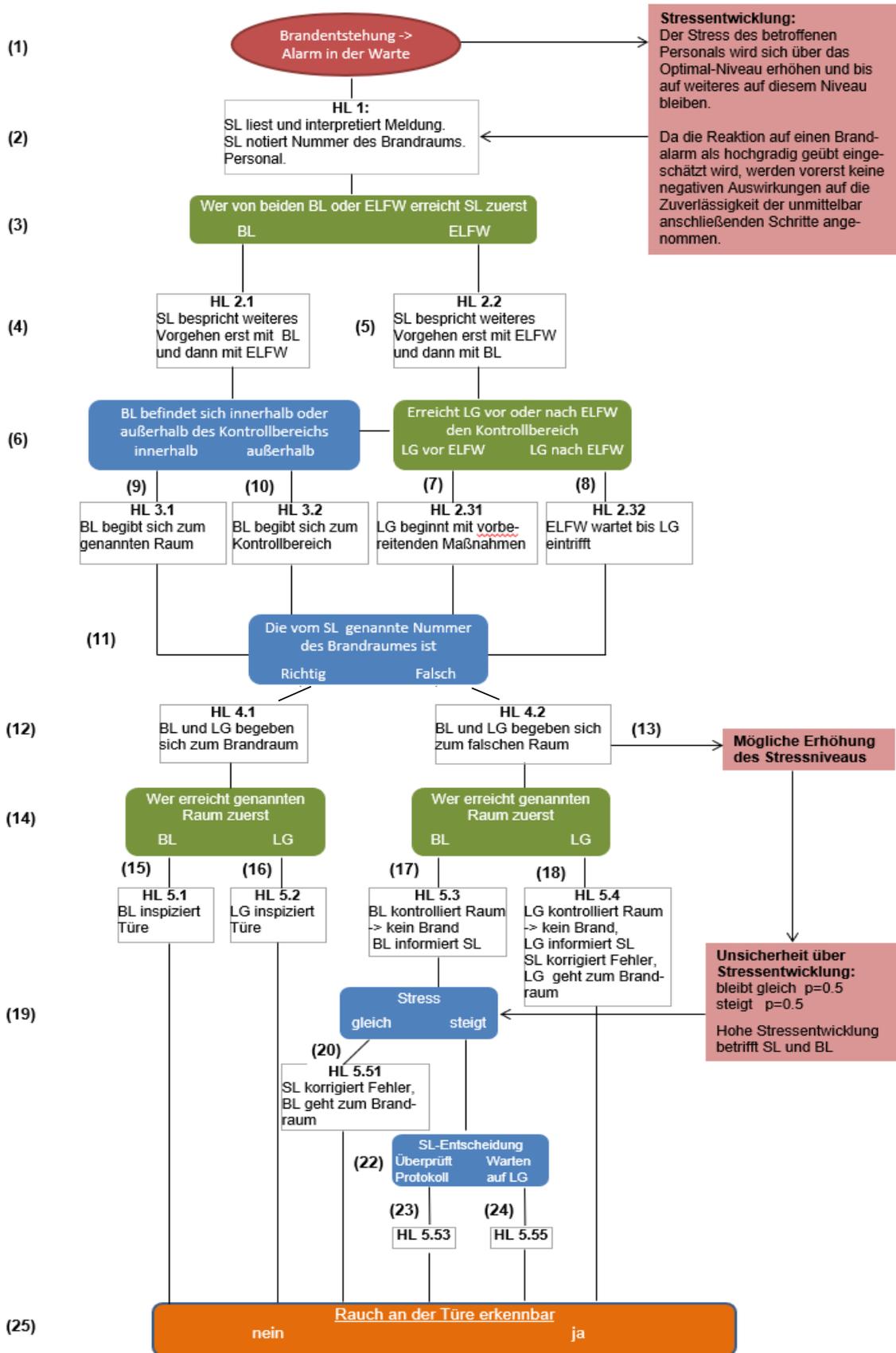
In der nachfolgenden Abb. 5.7 ist der Ablauf der Brandbekämpfungsmaßnahme in Abhängigkeit zufälliger Einflussfaktoren, zeitlichen Abhängigkeiten sowie Abhängigkeiten von Prozesszuständen in einem Ablaufdiagramm grob skizziert. Die einzelnen Schritte des Handlungsablaufs sowie die Basishandlungen der jeweiligen Handlungslisten (HL) werden nachfolgend ausführlich beschrieben.

Die Beschreibungen der Basishandlungen zu den Handlungslisten werden ergänzt um die Annahmen zu den Fehlermöglichkeiten und den Ausprägungen des Faktors Stress. Es wird davon ausgegangen, dass vor Kenntnisnahme des Brandfalls bei jeder betrachteten Person ein Stressniveau vorliegt, das ins Swains Terminologie „optimal“ ist. Die Personen arbeiten bis zu diesem Zeitpunkt ohne Über- oder Unterforderungen, die die Leistung und Zuverlässigkeit der Aufgabenbearbeitung mindern.

In Abb. 5.7 sind Abhängigkeiten des Handlungsablaufs von

- zeitlichen Einflüssen durch grüne Rechtecke (siehe z. B. Punkt **(3)** oder **(14)**),
- Prozesszuständen durch orangene Rechtecke (siehe z. B. Punkt **(25)**) und
- stochastischen Einflussgrößen durch blaue Rechtecke (siehe z. B. Punkt **(6)** oder **(11)**)

gekennzeichnet. Außerdem sind diejenigen Stellen aufgeführt, wo sich eine Stressänderung ergeben kann bzw. wo der Stress einen Einfluss auf den Handlungsablauf haben kann.



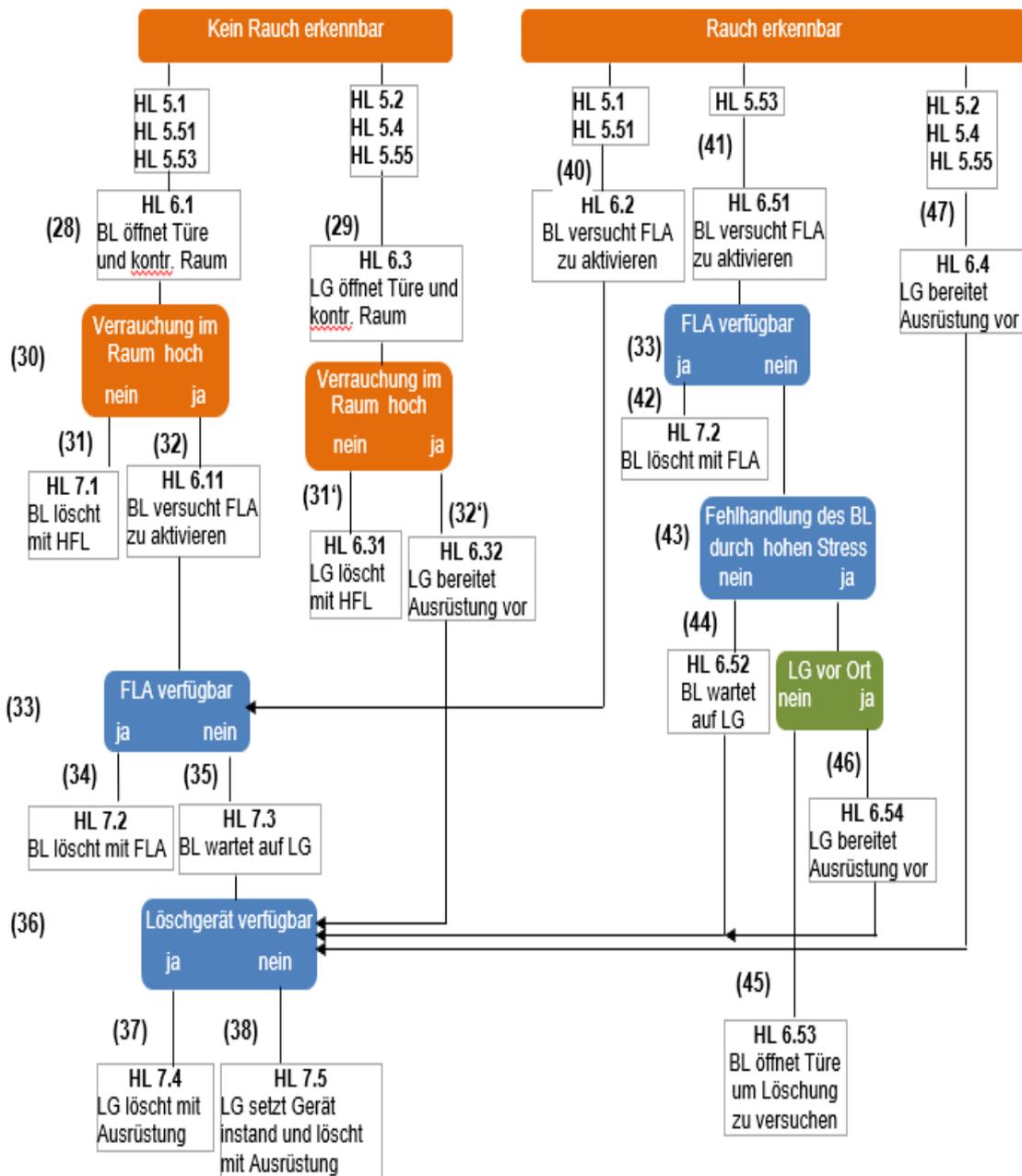


Abb. 5.7 Ablaufdiagramm der Brandbekämpfungsmaßnahme in Abhängigkeit von stochastischen Einflussgrößen, Prozesszuständen, zeitlicher Wechselwirkungen sowie des Faktors Stress als dynamische Größe

Im Nachfolgenden werden die Handlungsabläufe der in Abb. 5.7 gekennzeichneten Punkte (1) – (47) im Detail beschrieben. An dieser Stelle wird insbesondere darauf hingewiesen, dass die in Abb. 5.7 aufgeführten Punkte lediglich als Referenzen zu verstehen sind, die nur auf die jeweils abgebildeten Stellen des Handlungsablaufs verweisen. Die Punkte (1), (2) etc. sind hier deshalb nicht als fortlaufende Nummerierung zu interpretieren.

Aus Gründen einer übersichtlichen Darstellung geht die Beschreibung auf die Ausprägungen leistungsbestimmender Faktoren explizit nur dann ein, wenn zu erläutern ist,

- wie sie zu einem unterstellten Fehler beitragen oder
- aus welchen Gründen davon auszugehen ist, dass trotz eines an sich fehlerförderlichen Faktors kein Fehler auftritt (z. B. wegen hoher Konzentration der Aufmerksamkeit auf die Handlung, die nachteilige Effekte erhöhten Stresses ausgleicht).

Sofern die Beschreibung des Handlungsablaufs bei den einzelnen Handlungen nicht auf leistungsbestimmende Faktoren eingeht, wurde unterstellt, dass bei den betreffenden Handlungen keine Fehler aufgrund von Faktoren mit leistungsmindernden Ausprägungen auftreten.

(1) Alarmmeldung in der Warte:

Wenn die Brandmeldeanlage auslegungsgemäß funktioniert, geht nach der Entstehung des Brandes die Alarmmeldung von mindestens zwei Brandmeldern innerhalb kurzer Zeit in der Warte ein. Ab diesem Zeitpunkt beginnt der Handlungsablauf der Brandbekämpfung durch das Anlagenpersonal.

Stress: Die Brandmeldung löst sicherlich Unruhe und Besorgnis, also negative Gefühle, aus. Das Vorgehen in HL1 dürfte aber geübt sein, so dass der Brand keine Panik oder der Panik nahe psychische Zustände auslösen wird, die ein weiteres Handeln blockieren. D. h., der Stress des betroffenen Personals erhöht sich über das Optimal-Niveau und bleibt zunächst konstant auf diesem Niveau. Da die Reaktion auf einen Brandalarm als hochgradig geübt eingeschätzt wird, werden vorerst keine negativen Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der unmittelbar anschließenden Schritte angenommen.

(2) Basishandlungen der HL 1:

Die ersten stattfindenden Handlungen erfolgen in der Handlungsliste 1 (HL1). Die HL1 setzt sich aus den folgenden Basishandlungen zusammen:

Sobald der Alarm in der Warte eintrifft (akustischer Alarm und Ausgabe des Alarmprotokolls über Drucker in der Warte), geht der Schichtleiter zum Ort des Druckers, liest die Brandmeldung und überlegt die nächsten durchzuführenden Schritte. Für die Zeitdauer, die der SL für diese Aktion benötigt, wird eine gleichverteilte Zufallszeit angenommen,

die zwischen 20 und 45 s liegt, d. h. $t \sim U(20,45)$ s. (Die Aktionen 'SL geht zum Drucker, liest Meldung und überlegt nächste Schritte' könnten hier auch als einzelne Basishandlungen mit den entsprechenden Ausführungszeiten definiert werden.)

Der Schichtleiter notiert sich die Informationen zum Brandort auf einem Zettel. Dauer: 5 – 10 s. Während dieser Aktion besteht die Fehlermöglichkeit, dass er aus Versehen eine andere (im Folgenden bezeichnet als „falsche“) Raumnummer notiert. Es wird angenommen, dass sich der falsch angegebene Raum ebenfalls (d. h. wie der richtige Brandraum) innerhalb des Kontrollbereichs befindet. Als Fehlerwahrscheinlichkeit wird $P = 0,015$, als Error Factor $EF = 5$ (siehe THERP, Tabelle 15-2 (3) unter Berücksichtigung von Tab. 17-1 (5) in /SWA 83/) zugrunde gelegt. Als Folge des möglichen Fehlers gibt der Schichtleiter die falsche Raumnummer an den Brandläufer, den Einsatzleiter der Feuerwehr und die Löschgruppe weiter mit der sicheren Folge, dass Brandläufer, Löschgruppe und Einsatzleiter der Feuerwehr den falschen Raum aufsuchen. Der Schichtleiter wird bei allen weiteren Kommunikationen stets solange den falschen Raum benennen, bis der Irrtum vor Ort entdeckt wird. Konservativ wird davon ausgegangen, dass kein Mitglied der Schichtmannschaft in der Warte das Druckerprotokoll kontrolliert und den Fehler des Schichtleiters spätestens bis zu dem Zeitpunkt erkennt, wann dieser seine Durchsagen über Lautsprecher macht.

Um das Anlagenpersonal über die Alarmmeldung zu informieren, geht der Schichtleiter zur Schaltstelle der Funkmeldeanlage und funkt gleichzeitig den Einsatzleiter der Feuerwehr, den Brandläufer sowie die Personen der Löschgruppe an. Dies geschieht durch zwei untereinander liegende Knöpfe. Dafür wird eine Zufallszeit $t \sim U(10,20)$ s angenommen.

Zusätzlich zum Absetzen des Funkrufs alarmiert der Schichtleiter die betroffenen Personen über die Lautsprecheranlage. Dazu geht er zu dem Platz in der Warte, von dem aus er die Lautsprecherdurchsage absetzen kann. Dazu wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(4,10)$ s angenommen.

Über die Lautsprecheranlage wird das Personal durch wiederholte Durchsagen vom Schichtleiter alarmiert. Es wird angenommen, dass die durch die Wiederholungen der Inhalte sowie durch langsames und deutliches Sprechen die Durchsagen des Schichtleiters eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(75,120)$ s in Anspruch nehmen. Dabei wird angenommen, dass pro Durchsage 25 – 30 s benötigt werden und 3 – 4 Wiederholungen der Durchsagen erfolgen.

Einsatzleiter der Feuerwehr und Brandläufer wissen, dass sie in der Warte zurückrufen sollen, um die speziellen Anweisungen des Schichtleiters zu erhalten. Beide versuchen unabhängig voneinander den Schichtleiter über das Telefon zu erreichen.

Dazu begibt sich der Einsatzleiter der Feuerwehr von seinem gegenwärtigen Standort zum nächsten erreichbaren Telefon. Da der Aufenthaltsort des Einsatzleiters der Feuerwehr 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 Einsatzleiter der Feuerwehr benötigt, um das nächste Telefon zu erreichen. Um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, wird für die Zeit des Einsatzleiters der Feuerwehr, das nächste Telefon zu erreichen, eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(15,60)$ s angenommen.

Parallel zum Einsatzleiter der Feuerwehr begibt sich auch der Brandläufer von seinem gegenwärtigen Standort zum nächsten erreichbaren Telefon. Im Gegensatz zu diesem wird für den Brandläufer angenommen, dass für ihn das nächste Telefon schneller zu erreichen ist, da er sich innerhalb des Reaktorgebäudes befindet. Für die Zeit des Brandläufers um das nächste Telefon zu erreichen, wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(10,25)$ s abgeschätzt.

Die Personen der Löschgruppe begeben sich nach der Alarmierung durch den Schichtleiter ohne Rückfrage sofort auf den Weg zum Kontrollbereich. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Information, welcher Raum durch den Brand betroffen ist, durch die Lautsprecherdurchsage des Schichtleiters mitgeteilt worden ist. Die Löschgruppe setzt sich aus verschiedenen Personen zusammen, die sich bei der Alarmierung an unterschiedlichen Standorten befinden und somit unterschiedlich weit vom Eingang des Kontrollbereichs entfernt sind. Um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, wird für den Zeitbedarf, bis sich die Löschgruppe vor dem Eingang des Kontrollbereichs zusammengefunden hat, eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(180,480)$ s abgeschätzt.

Sobald der Einsatzleiter der Feuerwehr oder der Brandläufer das nächst liegende Telefon erreicht haben, wählen sie die Nummer des Schichtleiters in der Warte an und warten, bis dieser den Anruf entgegennimmt, $t \sim U(4,10)$ s.

Für die Modellierung wird angenommen, dass der Schichtleiter keinen Fluchalarm auslöst, der die Personen (außer dem Brandläufer) zum Verlassen des Kontrollbereichs auffordert.

(3) Abhängigkeit des Handlungsablaufs von zeitlichen Einflüssen:

Einsatzleiter der Feuerwehr und Brandläufer versuchen unabhängig voneinander den Schichtleiter über Telefon zu erreichen. Wer als erster von den beiden die entsprechenden Anweisungen vom Schichtleiter entgegennimmt und sich auf den Weg zum Brandraum begeben kann hängt davon ab, wer zuerst die Verbindung mit dem Schichtleiter bekommt. Über die Simulation der Handlungsdynamik durch das Crew-Modul wird festgelegt, wer sich zufällig als erster beim Schichtleiter meldet. Dabei spielen insbesondere die Zeiten eine Rolle, wie lange der Einsatzleiter der Feuerwehr bzw. der Brandläufer brauchen, um das nächste Telefon zu erreichen, um den Schichtleiter anzurufen. Diese zeitliche Abhängigkeit bewirkt einen unterschiedlichen Handlungsablauf, der durch die Handlungslisten HL 2.1 und HL 2.2 beschrieben wird.

(4) Basishandlungen der HL 2.1:

Wenn der Brandläufer den Schichtleiter zuerst erreicht, teilt der Schichtleiter dem Brandläufer die Nummer des betroffenen Raumes mit, die er sich notiert hat und bespricht weiteres Vorgehen. Der Schichtleiter weist den Brandläufer an, zum genannten Raum zu gehen und, falls es die Situation zulässt, einen ersten Löschversuch des Brandes zu unternehmen. Es wird angenommen, dass die Unterweisung des Brandläufers eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(60,90)$ s in Anspruch nimmt. Solange der Schichtleiter mit dem Brandläufer spricht, ist er beschäftigt und kann den Anruf vom Einsatzleiter der Feuerwehr nicht entgegennehmen.

Nach Beendigung des Gesprächs mit diesem nimmt der Schichtleiter den Anruf des Einsatzleiters der Feuerwehr entgegen. Der Schichtleiter erläutert dem Einsatzleiter der Feuerwehr die Information des Alarmprotokolls und bespricht mit ihm kurz die weiteren Maßnahmen. Da das Vorgehen der Brandbekämpfung zumindest in Umrissen besprochen wird, ist davon auszugehen, dass das Gespräch mit dem Einsatzleiter der Feuerwehr etwas länger dauern wird. Für die Dauer des Gesprächs wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(120,150)$ s angenommen.

Nach dem Gespräch mit dem Schichtleiter begibt sich der Einsatzleiter der Feuerwehr (mit der u. U. falschen Information über den Brandraum) zum Kontrollbereich, der von seinem aktuellen Standort unterschiedlich weit entfernt sein kann. Zur Berücksichtigung dieser Unsicherheit wird für den Weg, den der Einsatzleiter der Feuerwehr bis zum Kontrollbereich zurücklegt, eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(60,300)$ s angenommen.

In diesem Handlungsablauf wird der Brandläufer vor dem Einsatzleiter der Feuerwehr angewiesen und kann sich deshalb entsprechend früher zum genannten Raum begeben.

(5) Basishandlungen der HL 2.2:

Wenn der Einsatzleiter der Feuerwehr den Schichtleiter zuerst erreicht, erläutert dieser ihm die Information des Alarmprotokolls und bespricht mit ihm kurz die weiteren Maßnahmen. Da Vorgehen der Brandbekämpfung zumindest in Umrissen besprochen wird, wird für die Dauer des Gesprächs eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(120,150)$ s angenommen. Solange der Schichtleiter mit dem Einsatzleiter der Feuerwehr spricht, ist er beschäftigt und kann den Anruf vom Brandläufer nicht entgegennehmen.

Nach Beendigung des Gesprächs mit dem Einsatzleiter der Feuerwehr nimmt der Schichtleiter den Anruf des Brandläufers entgegen. Der Schichtleiter teilt die Nummer des betroffenen Raumes mit, die er sich notiert hat und bespricht das weitere Vorgehen. Der Schichtleiter weist den Brandläufer an, zum genannten Raum zu gehen und, falls es die Situation zulässt, einen ersten Löschversuch des Brandes zu unternehmen. Es wird angenommen, dass die Unterweisung des Brandläufers eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(60,90)$ s in Anspruch nimmt.

In diesem Fall wird der Einsatzleiter der Feuerwehr vor dem Brandläufer angewiesen. Der Brandläufer muss ggf. warten, bis der Schichtleiter sein Gespräch mit diesem beendet hat, um seine Anweisungen zu erhalten.

(6) Abhängigkeit des Handlungsablaufs von aleatorischer Unsicherheit und zeitlichen Einflüssen:

Nach der Unterweisung durch den Schichtleiter begeben sich Brandläufer und Einsatzleiter der Feuerwehr zu unterschiedlichen Zeiten, je nachdem wer vom Schichtleiter zuerst unterwiesen wurde, auf den Weg zum genannten (u. U. falschen) Raum. Da sich der Brandraum innerhalb des Kontrollbereichs befindet (es wird angenommen, dass auch der falsche Raum innerhalb des Kontrollbereichs liegt), ist die Zeit, die der Brandläufer zum Erreichen des Raumes benötigt, davon abhängig, ob sich der Brandläufer zufällig bereits im Kontrollbereich befindet oder nicht. Die davon abhängigen Handlungen sind in den Punkten (9) bzw. (10) beschrieben.

Löschgruppe und Einsatzleiter der Feuerwehr befinden sich unabhängig voneinander auf dem Weg zum Eingang des Kontrollbereichs. Der Handlungsablauf für den Einsatzleiter der Feuerwehr hängt davon ab, ob die Löschgruppe vor ihm am Eingang des Kontrollbereichs eintrifft oder ob der Einsatzleiter der Feuerwehr vor der Löschgruppe den Kontrollbereich erreicht. Die davon abhängigen Handlungen sind in den Punkten (7) bzw. (8) beschrieben.

(7) Basishandlungen der HL 2.31:

Wenn die Löschgruppe vor dem Einsatzleiter der Feuerwehr am Kontrollbereich ankommt, beginnt sie schon mit ihren vorbereitenden Arbeiten. Für diese Arbeiten wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(240,360)$ s angenommen.

Ist die Löschgruppe mit ihren vorbereitenden Arbeiten fertig und der Einsatzleiter der Feuerwehr noch nicht am Eingang des Kontrollbereichs angekommen, begibt sich die Mannschaft der Löschgruppe selbständig in den Kontrollbereich, um zum vom Schichtleiter genannten Raum zu gehen.

(8) Basishandlungen der HL 2.32:

Wenn der Einsatzleiter der Feuerwehr vor der Löschgruppe am Kontrollbereich ankommt, muss er auf die Mitglieder der Löschgruppe warten, damit sie sich zusammen auf den Weg zum genannten Raum begeben können.

Sobald die Mitglieder der Löschgruppe am Eingang des Kontrollbereichs ankommen, beginnen sie mit den vorbereitenden Arbeiten. Es wird davon ausgegangen, dass durch die Anwesenheit des Einsatzleiters der Feuerwehr die Zeit für die vorbereitenden Arbeiten etwas kürzer als unter (7) ausfällt. Dafür wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(180,300)$ s angenommen.

(9) Basishandlungen der HL 3.1:

Wenn sich der Brandläufer zum Zeitpunkt der Alarmierung durch den Schichtleiter bereits innerhalb des Kontrollbereichs befindet, ist nur der genaue Aufenthaltsort im Kontrollbereich unbestimmt. Abhängig von seinem Standort wird er für den Weg zum angegebenen (u. U. falschen) Raum mehr oder weniger Zeit benötigen. Für den Weg, den der Brandläufer zum betreffenden Raum benötigt, wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(20,420)$ s angenommen. Die höheren Zeiten tragen der Situation Rechnung, dass

sich der Brandläufer in einem vom Raum entfernten Teil des Kontrollbereichs befinden kann. Die niedrigen Zeiten beschreiben die Situationen, in denen sich der Brandläufer zufällig in unmittelbarer Nähe zum angegebenen Raum befindet.

Wenn sich der Brandläufer innerhalb des Kontrollbereichs befindet, ist die Unsicherheit bzgl. der Wegezeit unabhängig davon, ob der genannte Brandraum korrekt ist oder nicht. Dies liegt an der Unsicherheit, wo sich der Brandläufer im Kontrollbereich befindet.

(10) Basishandlungen der HL 3.2:

Befindet sich der Brandläufer zum Zeitpunkt der Alarmierung durch den Schichtleiter außerhalb des Kontrollbereichs, begibt er sich auf den Weg zum Eingang des Kontrollbereichs. Dabei wird angenommen, dass sich der in Frage kommende Brandläufer nicht allzu weit vom Eingang des Kontrollbereichs entfernt befindet. Für den Weg zum Eingang des Kontrollbereichs wird eine Zufallszeit $t \sim U(30,120)$ s angenommen.

Beim Eingang des Kontrollbereichs angekommen, nimmt der Brandläufer eines der Dosimeter, welche dort in großer Zahl verfügbar sind ($t \sim U(6,12)$ s) und betritt den Kontrollbereich. Da der Brandläufer nicht durch den Eingangsmonitor muss und direkt durch die Tür gehen kann, wird für das Betreten eine relativ kurze Zeit $t \sim U(5,10)$ s angenommen.

(11) Abhängigkeit des Handlungsablaufs von aleatorischer Unsicherheit:

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.015 wird angenommen, dass sich der Schichtleiter eine falsche Raumnummer notiert und diese fälschlicherweise dem Personal mitgeteilt hat.

Mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.985 begeht der Schichtleiter diesen Fehler nicht und hat dem beteiligten Personal die richtige Nummer des Brandraums mitgeteilt.

Die weiteren Handlungsabläufe werden in den Punkten (12) bzw. (13) in Abhängigkeit davon beschrieben, ob der Schichtleiter die richtige oder falsche Raumnummer kommuniziert hat.

(12) Basishandlungen der HL 4.1:

Wenn der Schichtleiter dem Personal die richtige Raumnummer mitgeteilt hat, begibt sich die Löschgruppe vom Eingang des Kontrollbereichs zum Brandraum. Da sich der Brandraum in der Nähe des Eingangs zum Kontrollbereich befindet, wird für den Weg der Löschgruppe (mit oder ohne Einsatzleiter der Feuerwehr) eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(60,100)$ s angenommen.

Wenn der Brandläufer den Kontrollbereich betreten hat, begibt er sich zum Brandraum. Es wird angenommen, dass sich der Brandläufer etwas schneller bewegen kann als die Löschgruppe mit ihrer Ausrüstung. Für den Brandläufer wird für den Weg zum Brandraum eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(30,60)$ s angenommen. Die Situation, in der sich der Brandläufer innerhalb des Kontrollbereichs befindet, wurde unter Punkt (9) beschrieben.

(13) Basishandlungen der HL 4.2:

Wenn der Schichtleiter dem Personal die falsche Raumnummer mitgeteilt hat, begibt sich die Löschgruppe vom Eingang des Kontrollbereichs zu dem falsch benannten Raum. Es wird angenommen, dass der falsche Raum vom Eingang des Kontrollbereichs mehr oder weniger weit entfernt liegen kann. Für den Weg der Löschgruppe zum falsch benannten Raum wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(40,300)$ s angenommen.

Entsprechend begibt sich auch der Brandläufer in diesem Fall zum falsch benannten Raum. Da angenommen wird, dass sich der Brandläufer etwas schneller bewegen kann als die Löschgruppe mit ihrer Ausrüstung, wird für den Weg des Brandläufers zum Brandraum eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(20,240)$ s angenommen. Die Situation, dass sich der Brandläufer innerhalb des Kontrollbereichs befindet, wurde unter Punkt (9) beschrieben.

(14) Zeitliche Abhängigkeit:

Brandläufer und Löschgruppe begeben sich unabhängig voneinander auf den Weg zum Raum, der vom Schichtleiter genannt wurde. Der weitere Handlungsablauf hängt davon ab, ob zuerst der Brandläufer oder die Löschgruppe mit ihrer Ausrüstung am genannten Raum ankommt. Die unterschiedlichen Handlungsabläufe werden in den HL 5.1 und 5.2 beschrieben.

(15) Basishandlungen der HL 5.1:

Falls der Brandläufer vor der Löschgruppe den Brandraum erreicht, wird er, bevor er den Brandraum betritt, eine kurze Inspektion der Tür vornehmen. Dazu wird er darauf achten, ob am Türspalt Rauchentwicklung zu erkennen ist und die Klinke der Tür berühren und ggf. über die Oberfläche der Tür streichen, um abzuschätzen, ob sich bereits hohe Temperaturen im Raum entwickelt haben. Für die kurze Untersuchung wird eine Zufallszeit $t \sim U(10,16)$ s angenommen.

(16) Basishandlungen der HL 5.2:

Falls die Löschgruppe vor dem Brandläufer den Brandraum erreicht, wird sie vor Betreten des Brandraums eine kurze Inspektion der Tür vornehmen. Dazu wird die Löschgruppe darauf achten, ob am Türspalt Rauchentwicklung zu erkennen ist und die Klinke der Tür berühren und ggf. über die Oberfläche der Tür streichen, um abzuschätzen, ob sich bereits hohe Temperaturen im Raum entwickelt haben. Für die kurze Untersuchung wird wie für den Brandläufer eine Zufallszeit $t \sim U(10,16)$ s angenommen.

(17) Basishandlungen der HL 5.3:

Wenn der Brandläufer vor der Löschgruppe am 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 Untersuchung wird eine Zufallszeit $t \sim U(10,16)$ s angenommen.

Da es sich nicht um den Brandraum handelt, stellt der Brandläufer keine Besonderheiten fest, öffnet die Tür und betritt den Raum ($t = 3$ s). Da der Brandläufer davon ausgeht, dass er sich im Brandraum befindet, 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 gleichverteilte Zufallszeit zwischen 30 und 60 s angenommen, d. h. $t \sim U(30,60)$ s.

Nachdem der Brandläufer keine Anzeichen für einen Brand erkennt, begibt er sich zum nächsten Telefon, das sich im Raum befindet, und versucht den Schichtleiter in der Warte zu erreichen. Zufallszeit: $t \sim U(10,20)$ s.

Der Brandläufer informiert den Schichtleiter, dass er kein Anzeichen eines Brandes im Raum entdeckt hat und schildert die Situation. Zufallszeit: $t \sim U(10,15)$ s.

Der Schichtleiter lässt sich Raumnummer wiederholen. Sie entspricht seinen Erwartungen und seiner Notiz. Er könnte sich trotzdem genauer beschreiben lassen, was der Brandläufer alles getan hat, um sicher zu gehen, dass er den Raum gründlich überprüft hat. Zufallszeit: $t \sim U(30,60)$ s.

Die Tatsache, dass der Brandläufer keinen Brandherd im besagten Raum entdeckt hat könnte dazu führen, dass der Stress (sowohl beim Schichtleiter als auch beim Brandläufer) auf ein Niveau ansteigt, dass sich auf die Zuverlässigkeit nachfolgender Handlungen und Entscheidungen auswirken kann.

(18) Basishandlungen der HL 5.4:

Wenn die Löschgruppe vor dem Brandläufer am falschen Raum angekommen ist, wird eine kurze Inspektion der Tür durchgeführt, da angenommen wird, dass es sich um den Brandraum handelt. Für die kurze Untersuchung wird eine Zufallszeit $t \sim U(10,20)$ s angenommen.

Da es sich nicht um den Brandraum handelt, stellt die Löschgruppe keine Besonderheiten fest, öffnet die Tür und betritt den Raum ($t = 3$ s). Da die Löschgruppe davon ausgeht, dass es sich um den Brandraum handelt, suchen die Mitglieder der Löschgruppe nach Anzeichen des Brandes, die sie jedoch nicht erkennen können. Es wird davon ausgegangen, dass der Raum sorgfältig von mehreren Personen überprüft wird, um sich zu vergewissern, dass kein Brand vorliegt. Dafür wird eine gleichverteilte Zufallszeit zwischen 45 und 90 s angenommen, d. h. $t \sim U(40,90)$ s.

Nachdem die Löschgruppe keine Anzeichen für einen Brand erkennt, begibt sich eine Person zum nächsten Telefon und versucht, den Schichtleiter in der Warte zu erreichen. Zufallszeit: $t \sim U(10,20)$ s.

Die Löschgruppe informiert den Schichtleiter, dass kein Anzeichen eines Brandes im Raum entdeckt wurde und beschreibt ausführlich die Situation. Zufallszeit: $t \sim U(60,90)$ s. Im Rahmen dieser Kommunikation wird angenommen, dass entweder der Schichtleiter selbst erkennt oder durch den Einsatzleiter der Löschgruppe darauf hingewiesen wird, das Alarmprotokoll nochmal zu überprüfen.

Der Schichtleiter führt daraufhin die nochmalige Überprüfung des Druckerprotokolls aus. Dabei wird angenommen, dass dieser seinen Fehler auch unter erhöhtem Stress mit

Sicherheit erkennt, weil seine Aufmerksamkeit allein auf die Meldung und ihre richtige Interpretation gerichtet ist. Allerdings könnte der Schichtleiter für die Überprüfung des Druckerprotokolls durch den hohen Stress mehr Zeit benötigen als normal. Hierfür wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(30,60)$ s angenommen.

Der Schichtleiter teilt der Löschgruppe den korrigierten Brandraum mit $t \sim U(15,30)$ s, worauf sich die Löschgruppe vom falschen Raum zum richtigen Brandraum begibt. Je nachdem wo sich der falsch benannte Raum befindet, wird der Weg mehr oder weniger viel Zeit beanspruchen. Um diese Unsicherheit zu berücksichtigen, wird für den Weg eine Zufallszeit $t \sim U(40,240)$ s angenommen.

Wenn die Löschgruppe den Brandraum erreicht, wird sie eine kurze Untersuchung der Brandraumbür vornehmen $t \sim U(10,16)$ s.

(19) Unsicherheit der Stressentwicklung:

In der Situation, in der entweder vom Brandläufer oder der Löschgruppe kein Brand im Raum entdeckt wird, besteht die Möglichkeit, dass der Stress des Personals so weit ansteigt, dass er sich auf die Zuverlässigkeit nachfolgender Handlungen und Entscheidungen auswirken kann. Dabei wird angenommen, dass sich insbesondere bei Schichtleiter und Brandläufer und weniger bei der Löschgruppe eine solch hohe Stressentwicklung einstellen kann.

Allerdings besteht die Unsicherheit darin, ob sich in dieser Situation eine leistungsmindernde Stressentwicklung einstellt oder nicht. Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen wird für die Analyse angenommen, dass sich mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,5$ das Stressniveau von Schichtleiter und Brandläufer nicht so stark erhöht, dass dadurch die Fehlerwahrscheinlichkeiten von Schichtleiter und Brandläufer beeinflusst werden. Mit einer Wahrscheinlichkeit von ebenfalls $P = 0,5$ erhöht sich das Stressniveau von Schichtleiter und Brandläufer so stark, dass dadurch die Entscheidungen des Schichtleiters und die Handlungen des Brandläufers beeinflusst werden.

(20) Basishandlungen der HL 5.51:

Bei gleichbleibendem Stressniveau des Schichtleiters wird angenommen, dass sich dieser an die Betriebsstrategie mit den entsprechenden betrieblichen Anforderungen (entsprechend KTA 1402, 4.2.1 (2) a)) erinnert, seine Entscheidungen im Sinne der Sicher-

heit zu treffen. Deshalb wird er noch einmal das Druckerprotokoll mit der Brandmeldung als ursprünglicher Informationsquelle sorgfältig überprüfen. Führt der Schichtleiter die Kontrolle des Druckerprotokolls aus, erkennt er seinen Fehler mit Sicherheit, weil seine Aufmerksamkeit auf die Meldung und ihre richtige Interpretation gerichtet ist. Für die Überprüfung des Druckerprotokolls wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(30,45)$ s angenommen.

Der Schichtleiter teilt dem Brandläufer den korrigierten Raum mit und weist ihn an sich unverzüglich dorthin zu begeben und den Raum zu kontrollieren. Zufallszeit: $t \sim U(10,20)$ s.

Nachdem der Brandläufer vom Schichtleiter die korrigierte Anweisung erhalten hat, begibt er sich zum richtigen Brandraum. Dieser kann in der Nähe des falschen Raumes liegen, oder aber von diesem weiter entfernt sein. In dieser Situation wird davon ausgegangen, dass sich der Brandläufer beeilt, zum richtigen Raum zu kommen. Für die Zeit, die der Brandläufer vom falschen bis zum korrekten Brandraum benötigt, wird eine Zufallszeit $t \sim U(20,180)$ s angenommen.

Wenn der Schichtleiter seinen Fehler erkannt hat, fordert er per Lautsprecherdurchsage Löschgruppe und Einsatzleiter der Feuerwehr auf, Kontakt mit der Warte aufzunehmen. Reagieren Löschgruppe und Einsatzleiter der Feuerwehr mit einem Rückruf, wird ihnen vom Schichtleiter die korrekte Raumnummer genannt, die sie durch Wiederholung bestätigen. Auch wenn der Schichtleiter in seiner Lautsprecherdurchsage die korrekte Raumnummer nennt, wird er einen Rückruf zur Bestätigung seiner Durchsage fordern. Wegen der gesteigerten Aufmerksamkeit für die richtige Übermittlung der Information wird davon ausgegangen, dass diese Aktionen fehlerfrei verlaufen wird. Daraufhin werden sich der Einsatzleiter der Feuerwehr und die Löschgruppe auf den Weg zum richtigen Brandraum begeben. Für die Dauer dieser Aktionen (inklusive der Wegezeit) wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim (180,360)$ s angenommen.

Wenn der Brandläufer den Brandraum erreicht, wird er vor Betreten des Brandraums eine kurze Inspektion der Tür auf Rauchentwicklung und erhöhte Temperaturen vornehmen. Für die kurze Untersuchung wird eine Zufallszeit $t \sim U(10,16)$ s angenommen.

(22) Unsicherheit der Entscheidung des SL bei hohem Stress:

Bei signifikanter Erhöhung des Stressniveaus, die die Zuverlässigkeit des Handelns beeinträchtigen kann, werden 2 Entscheidungsalternativen angenommen, die vom Schichtleiter mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten getroffen werden können.

Die erste Alternative besteht darin, dass sich der Schichtleiter daran erinnert, das Druckerprotokoll zu überprüfen. Da der Schichtleiter einem hohen Stress ausgesetzt ist, wird angenommen, dass er zu diesem Entschluss erst nach einer gewissen Verzögerungszeit kommt. Die Verzögerungszeit kann sich aus einer gedanklichen Blockade ergeben, die sich aus dem hohen Stress ergibt.

Die zweite Entscheidungsalternative des Schichtleiters besteht darin, dass er die Umsetzung der nochmaligen Überprüfung des Druckerprotokolls unterlässt und den Brandläufer anweist auf die Löschgruppe zu warten.

Die Entscheidung für die erneute Prüfung des Druckerprotokolls wird als Umsetzung einer Forderung der Anlagenpolitik bewertet (THERP, Tabelle 16-5 (1) in /SWA 83/). Die Unterlassung der Umsetzung wird mit $P = 0,02$ (Fehlerfaktor 5) bewertet. Der Referenzwert der Wahrscheinlichkeit zur Entscheidung der ersten Alternative ist $Q = 1 - P = 0,98$.

(23) Basishandlungen der HL 5.53:

Im Fall der Entscheidungsalternative 1 erinnert sich der Schichtleiter früher oder später an die Betriebsanforderungen, seine Entscheidungen im Sinne der Sicherheit zu treffen und das Alarmprotokoll nochmals zu überprüfen. Durch den hohen Stress kann mehr oder weniger viel Zeit verstreichen, bis er zu dieser Einsicht kommt. Als Reaktionszeit wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(20,60)$ s angenommen.

Wenn der Schichtleiter seine Entscheidung in diesem Sinne trifft, führt der Schichtleiter die Kontrolle des Druckerprotokolls aus. Dabei wird angenommen, dass er seinen Fehler mit Sicherheit erkennt, weil seine Aufmerksamkeit auf die Meldung und ihre richtige Interpretation gerichtet ist. Für die sorgfältige Überprüfung des Druckerprotokolls wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(30,45)$ s angenommen.

Der Schichtleiter teilt dem Brandläufer den korrigierten Raum mit und weist ihn an, sich unverzüglich dorthin zu begeben und den Raum zu kontrollieren. Zufallszeit: $t \sim U(10,20)$ s.

Nachdem der Brandläufer vom Schichtleiter die korrigierte Anweisung erhalten hat, begibt er sich zum richtigen Brandraum. Dieser kann in der Nähe des falschen Raumes liegen, oder aber von diesem weiter entfernt sein. In dieser Situation wird davon ausgegangen, dass sich der Brandläufer beeilt, zum richtigen Raum zu kommen. Für die Zeit, die der Brandläufer vom falschen bis zum korrekten Brandraum benötigt, wird eine Zufallszeit $t \sim U(20,180)$ s angenommen.

Da der Schichtleiter seinen Fehler erkannt hat, fordert er per Lautsprecherdurchsage die Löschgruppe und den Einsatzleiter der Feuerwehr auf, Kontakt mit der Warte aufzunehmen. Reagieren Löschgruppe und Einsatzleiter der Feuerwehr mit einem Rückruf, wird ihnen vom Schichtleiter die korrekte Raumnummer genannt, die sie durch Wiederholung bestätigen. Auch wenn der Schichtleiter in seiner Lautsprecherdurchsage die korrekte Raumnummer nennt, wird er einen Rückruf zur Bestätigung seiner Durchsage fordern. Wegen der gesteigerten Aufmerksamkeit für die richtige Übermittlung der Information wird davon ausgegangen, dass diese Aktionen fehlerfrei verlaufen. Daraufhin werden sich der Einsatzleiter der Feuerwehr und die Löschgruppe auf den Weg zum richtigen Brandraum begeben. Für die Dauer der Aktionen (inklusive der Wegezeit) wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim (180,360)$ s angenommen.

Wenn der Brandläufer den Brandraum erreicht, wird er vor Betreten des Brandraums eine kurze Inspektion der Tür auf Rauchentwicklung und erhöhte Temperaturen vornehmen. Für die kurze Untersuchung wird eine Zufallszeit $t \sim U(10,16)$ s angenommen.

(24) Basishandlungen der HL 5.55:

Im Fall der Entscheidungsalternative 2 vergisst der Schichtleiter aufgrund der hohen Stressentwicklung das Alarmprotokoll nochmals zu überprüfen. Stattdessen erhofft er sich Aufklärung durch die Löschgruppe. Er weist deshalb den Brandläufer an, auf die Löschgruppe zu warten $t \sim U(10,15)$ s.

Bei Ankunft der Löschgruppe wird diese zunächst vom Brandläufer über den Sachstand informiert, überprüft die Situation selbst und ruft den Schichtleiter in der Warte an $t \sim U(30,45)$ s.

Der Brandläufer wartet auf das Eintreffen der Löschgruppe. Bei Eintreffen der Löschgruppe wird der Einsatzleiter der Feuerwehr durch den Brandläufer über den Sachstand informiert. Nach kurzer Überprüfung der Situation ruft der Einsatzleiter der Feuerwehr den Schichtleiter in der Warte an.

Es wird angenommen, dass der unter hohem Stress stehende Schichtleiter durch die Kommunikation mit dem Einsatzleiter der Löschgruppe darauf hingewiesen wird, das Alarmprotokoll nochmals zu überprüfen. Dafür kann mehr oder weniger viel Zeit verstreichen. Als Verzögerungszeit, bis der Schichtleiter das Alarmprotokoll nochmals überprüft, wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim (30,90)$ s angenommen.

Der Schichtleiter führt daraufhin die nochmalige Überprüfung des Druckerprotokolls aus. Dabei wird angenommen, dass der Schichtleiter seinen Fehler auch unter dem hohen Stress mit Sicherheit erkennt, weil seine Aufmerksamkeit allein auf die Meldung und ihre richtige Interpretation gerichtet ist. Allerdings könnte der Schichtleiter für die Überprüfung des Druckerprotokolls durch den hohen Stress mehr Zeit benötigen als normal. Hierfür wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(30,45)$ s angenommen.

Der Schichtleiter teilt der Löschgruppe den korrigierten Raum mit und weist sie an, sich unverzüglich dorthin zu begeben. Die Zufallszeit beträgt $t \sim U(15,30)$ s.

Nachdem die Löschgruppe vom Schichtleiter die korrigierte Anweisung erhalten hat, begibt sie sich zum richtigen Brandraum. Dieser kann in der Nähe des falschen Raumes liegen, oder aber von diesem weiter entfernt sein. Für die Zeit, die die Löschgruppe vom falschen bis zum korrekten Brandraum benötigt, wird eine Zufallszeit $t \sim U(40,240)$ s angenommen.

Wenn die Löschgruppe den Brandraum erreicht, wird sie vor Betreten des Brandraums eine kurze Inspektion der Tür auf Rauchentwicklung und erhöhte Temperaturen vornehmen. Für die kurze Untersuchung wird eine Zufallszeit $t \sim U(10,16)$ s angenommen.

Es wird angenommen, dass sich der Stress der Löschgruppe aufgrund dieser Situation nicht maßgeblich erhöht.

(25) Abhängigkeit vom Prozesszustand:

Je nachdem wie weit die Brandentwicklung im Brandraum fortgeschritten ist, kann Rauch unter der Tür sichtbar sein bzw. die Temperatur der Tür erhöht sein. Wenn Brandläufer und Löschgruppe am tatsächlichen Brandraum ankommen, werden sie unterschiedliche Maßnahmen in Abhängigkeit davon durchführen, ob Rauch unter der Tür sichtbar bzw. die Temperatur der Tür erhöht ist oder nicht. Dies dient als Modellierungsbeispiel der Abhängigkeit des Handlungsablaufs vom Prozesszustand.

(28) Basishandlungen der HL 6.1:

Wenn der Brandläufer den Brandraum erreicht und er keinen Rauch unter der Tür hervortreten sieht, öffnet er die Tür ($t = 3$ s). Da kein Rauch unter der Tür sichtbar ist, wird davon ausgegangen, dass die Temperatur der Tür nicht merklich erhöht ist, was der Brandläufer feststellen könnte, wenn er den Türgriff berührt.

Er inspiziert den Raum, um sich ein Bild über die Situation zu machen $t \sim U(8,15)$ s.

Ab diesem Punkt führt der Brandläufer die gleichen Aktionen durch, egal ob er vom Pfad der HL 5.1, HL 5.51 oder vom Pfad der HL 5.53 kommt.

(29) Basishandlungen der HL 6.3:

Wenn die Löschgruppe den Brandraum erreicht und keinen Rauch unter der Tür hervortreten sieht, öffnet die Löschgruppe die Tür ($t = 3$ s). Da kein Rauch unter der Tür sichtbar ist, wird davon ausgegangen, dass die Temperatur der Tür nicht merklich erhöht ist, was die Löschgruppe feststellen könnte, wenn der Türgriff berührt wird.

Die Löschgruppe inspiziert den Raum, um sich ein Bild über die Situation zu machen $t \sim U(8,15)$ s.

(30) Abhängigkeit vom Prozesszustand:

Der weitere Handlungsablauf wird davon abhängen, wie stark die Verrauchung und Temperaturentwicklung vorangeschritten ist. Da die Rauchentwicklung bei einem Brand für Personen schneller zu einer Gefahr wird als zu hohe Temperaturen, wird hier nur die Verrauchung des Raumes betrachtet. Ist die Verrauchung zum Zeitpunkt der Türöffnung noch nicht sehr weit fortgeschritten, kann der Raum vom Personal betreten werden. Bei

stärkerer Rauchentwicklung wird das Personal ohne besonderen Schutz den Raum nicht gefahrlos betreten können. Wie stark die Verrauchung zum Zeitpunkt der Türöffnung im Raum ist, kann von einem deterministischen Rechenprogramm geliefert werden, mit dem das Brandszenario simuliert werden kann.

(31) Basishandlungen der HL 7.1:

Wenn die Rauchentwicklung im Brandraum noch nicht sehr weit fortgeschritten ist, wird der Brandläufer den Raum betreten.

Der Brandläufer begibt sich zum nächstgelegenen Handfeuerlöscher im Raum. Da sich Handfeuerlöscher in größerer Anzahl im oder in der Nähe des Raumes befinden, wird angenommen, dass eine Löschung mit diesen auf jeden Fall möglich ist. Für die Zeit, bis der Brandläufer den nächsten Handfeuerlöscher erreicht, wird $t \sim U(5,10)$ s angenommen.

Der Brandläufer nimmt den Handfeuerlöscher von der Halterung und bereitet ihn zur Löschung vor. Dafür wird eine Zufallszeit $t \sim U(8,20)$ s abgeschätzt.

Der Brandläufer lokalisiert den Brandherd und geht mit dem Handfeuerlöscher in die entsprechende Löschposition. Da das Auffinden des Brandherdes u. U. etwas länger dauern kann, wird eine Zufallszeit $t \sim U(20,45)$ s für diese Basishandlung angenommen.

Sobald der Brandläufer den Brandherd erreicht hat, beginnt er den Brand mit dem Handfeuerlöscher zu bekämpfen.

(31') Basishandlungen der HL 6.31:

Im Fall, dass die Löschgruppe den Raum inspiziert und die Rauchentwicklung im Brandraum noch nicht sehr weit fortgeschritten ist, wird die Löschgruppe den Raum betreten und versuchen den Brand mit dem Handfeuerlöscher zu bekämpfen, da dies am schnellsten geht und damit die wenigsten Löschschäden verursacht werden.

Da sich Handfeuerlöscher sich in größerer Anzahl im oder in der Nähe des Raumes befinden und auch die Löschgruppe mit Handfeuerlöschern ausgerüstet ist, wird angenommen, dass die Löschung mit einem Handfeuerlöscher auf jeden Fall möglich ist. Für die Zeit, bis Löschgruppe den nächsten Handfeuerlöscher erreicht, wird $t \sim U(5,10)$ s angenommen.

Die Löschgruppe bereitet Handfeuerlöscher zur Löschung vor. Dafür wird eine Zufallszeit $t \sim U(6,12)$ s angenommen.

Personen der Löschgruppe lokalisieren den Brandherd und begeben sich mit Handfeuerlöschern dorthin in Löschposition. Da sich mehrere Personen der Löschgruppe in den Raum begeben, um den Brandherd zu lokalisieren, wird hierfür (im Vergleich zum Brandläufer) eine kürzere Zeit von $t \sim U(12,20)$ s angenommen.

Sobald die Löschgruppe den Brandherd erreicht hat, beginnt die Löschgruppe den Brand mit dem Handfeuerlöscher zu bekämpfen.

(32) Basishandlungen der HL 6.11:

Wenn die Verrauchung im Brandraum zu hoch ist, wird der Brandläufer aus Sicherheitsgründen von sich aus die Entscheidung treffen, die Feuerlöschanlage (FLA), 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. Da die Automatik ausgefallen ist, muss sich der Brandläufer auf die andere Raumseite zur Ventilstation der Feuerlöschanlage begeben. Dort ist das Motorgetriebe ausgekuppelt, das Ventil kann jedoch von Hand aufgefahren werden. Für die Zeit, die der Brandläufer zum Erreichen der Ventilstation der Feuerlöschanlage benötigt, wird eine Zufallszeit $t \sim U(25,45)$ s angenommen. Dabei wird der Situation Rechnung getragen, dass der Brandläufer aufgrund der Rauchentwicklung nicht durch den Raum gehen kann, sondern einmal um den Reaktor herumlaufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen.

Obwohl das Versagen der Automatik der Feuerlöschanlage unerwartet ist, wird sich sein Stressniveau nicht wesentlich ändern, da für die Modellierung des Handlungsablaufs vorausgesetzt wird, dass der Brandläufer das nötige Wissen hat und davon ausgeht, dass er die Feuerlöschanlage manuell öffnen kann und den Raum nicht betreten muss.

Wenn der Brandläufer 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 Brandläufer eine gewisse Zeit benötigt, das Ventil von Hand aufzufahren. Für die benötigte Zeit, um das Ventil mit Hand zu öffnen wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(60,80)$ s angenommen.

(32') Basishandlungen der HL 6.32:

Wenn die Verrauchung im Brandraum zu hoch ist und der Raum ohne Schutzausrüstung nicht mehr gefahrlos betreten werden kann, wird sich die Löschgruppe auf eine Löschung mit ihrer Löschausrüstung vorbereiten. Dazu werden folgende Handlungen ausgeführt:

Die Löschgruppe holt den Schlauch aus dem Fach, wo er aufbewahrt wird, rollt ihn aus und schließt ihn an den Wasseranschluss an, $t \sim U(60,90)$ s.

Da sich die Rauchentwicklung im Raum bereits stark entwickelt hat, legt die Mannschaft der Löschgruppe ihre Pressluftatemgeräte an, $t \sim U(8,16)$ s.

Danach begeben sich die Personen der Löschgruppe mit ihrem Löschgerät in die Position, um so schnell wie möglich mit der Löschung beginnen zu können $t \sim U(5,12)$ s.

Der weitere Handlungsablauf wird unter den Punkten (36), (37) und (38) beschrieben.

(33) Abhängigkeit von Verfügbarkeit der Feuerlöschanlage:

Zufallsbedingt kann die Situation eintreten, dass das Ventil versehentlich zu stark verriegelt ist und der Brandläufer nicht in der Lage ist, das Ventil manuell aufzufahren. Dies könnte z. B. auf einen nicht behobenen Fehler bei dem letzten Eingriff an dem Ventil (z. B. im Rahmen einer Wartung) zurückzuführen sein.

Die aleatorische Unsicherheit, ob sich das Ventil manuell auffahren lässt und die Feuerlöschanlage verfügbar ist oder nicht, erfolgt über eine ASEP-Bewertung mit einer menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit von $HEP = 0,3$ und einem Fehlerfaktor = 3 (ASEP /SWA 87/, S. 3-1, 3-2, 4-7).

(34) Basishandlungen der HL 7.2:

Wenn das Ventil der Feuerlöschanlage vom Brandläufer manuell geöffnet werden kann, beginnt die Löschanlage den Raum mit Wasser zu besprühen. In diesem Fall erfolgt die Brandlöschung durch den Brandläufer über die Feuerlöschanlage.

(35) Basishandlungen der HL 7.3:

Wenn die Feuerlöschanlage durch den Brandläufer nicht manuell aktiviert werden kann und die Löschanlage somit nicht verfügbar ist, wird angenommen, dass der Brandläufer bei normalem bzw. leicht erhöhtem Stress folgende Handlungen durchführt:

Der Brandläufer informiert den Schichtleiter, dass sich die Automatik der Feuerlöschanlage nicht verfügbar ist und sich das Ventil der Feuerlöschanlage auch manuell nicht aktivieren lässt, $t \sim U(20,40)$ s.

Der Schichtleiter weist den Brandläufer an, auf die Löschgruppe zu warten und sie über die Situation zu informieren, sobald sie eintrifft, $t \sim U(15,30)$ s.

Sobald der Löschgruppe ankommt, wird sie vom Brandläufer über die vorliegenden Verhältnisse informiert, $t \sim U(30,45)$ s.

Die Löschgruppe holt den Schlauch aus dem Fach, wo er aufbewahrt wird, rollt ihn aus und schließt ihn an den Wasseranschluss an, $t \sim U(60,90)$ s.

Da sich die Rauchentwicklung im Raum bereits stark entwickelt hat, legt die Mannschaft der Löschgruppe ihre Pressluftatemgeräte an, $t \sim U(8,16)$ s.

Danach begeben sich die Personen der Löschgruppe mit ihrem Löschgerät in die Position, um so schnell wie möglich mit der Löschung beginnen zu können $t \sim U(5,12)$ s.

(36) Abhängigkeit von Verfügbarkeit der Löschausrüstung:

Der weitere Handlungsablauf ist von dem zufälligen Ereignis abhängig, ob die Löschausrüstung der Löschgruppe verfügbar ist und ohne Hindernisse verwendet werden kann. Bei dem Versuch, die Löschausrüstung einzusetzen, kann z. B. der Wasseranschluss oder der Schlauch defekt sein. Hier muss entweder ein Ersatzschlauch besorgt werden oder ein anderer Wasseranschluss gesucht werden. Für dieses Ereignis wird eine Wahrscheinlichkeit von 0,01 als Referenzwert abgeschätzt. Die epistemische Unsicherheit für die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Situation wird durch eine Beta-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 1.5$ und $\beta = 148.5$ beschrieben.

(37) Basishandlungen der HL 7.4:

Wenn die Löschausrüstung verfügbar ist, führt die Löschgruppe folgende Handlungen aus:

Die Löschgruppe öffnet die Tür zum Brandraum und setzt in Folge drei Sprühstöße in den Raum ab, $t \sim U(25,40)$ s.

Da hohe Rauchentwicklung vorliegt, holt die Löschgruppe die Wärmebildkamera um den Brand lokalisieren zu können, $t \sim U(10,20)$ s.

Es wird angenommen, dass die Löschgruppe zur Lokalisierung des Brandes eine Zufallszeit $t \sim U(30,90)$ s benötigt.

Sobald die Löschgruppe den Brand mit der Wärmebildkamera lokalisiert hat, beginnt die Löschung des Brandes der Löschgruppe mit ihrer Löschausrüstung.

(38) Basishandlungen der HL 7.5:

Wenn die Löschausrüstung nicht intakt ist, wird angenommen, dass zur Behebung des Defekts, der mehr oder weniger kompliziert sein kann, eine Zufallszeit $t \sim U(90,300)$ s benötigt wird.

Danach erfolgt der Handlungsablauf der Löschgruppe analog zu Punkt (37).

(40) Basishandlungen der HL 6.2:

In dieser Basishandlung liegt die Situation vor, dass der Brandläufer keine erhöhte Stressentwicklung erfährt und seine Aktionen bei gleichbleibendem Stress durchführt.

Wenn der Brandläufer vor der Löschgruppe den Brandraum erreicht und bereits Rauch unter der Tür sichtbar ist, wird er davon ausgehen, dass die Verrauchung im Brandraum entsprechend hoch ist. Es wird angenommen, dass der Brandläufer auch bei normaler bis leicht erhöhter Stressentwicklung aus Sicherheitsgründen versuchen wird, 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. Da die Automatik ausgefallen

ist, muss sich der Brandläufer auf die andere Raumseite zur Ventilstation der Feuerlöschanlage begeben. Dort ist das Motorgetriebe ausgekuppelt, das Ventil kann jedoch von Hand aufgefahren werden. Für die Zeit, die der Brandläufer zum Erreichen der Ventilstation dieser Löschanlage benötigt, wird eine Zufallszeit $t \sim U(25,45)$ s angenommen. Dabei wird der Situation Rechnung getragen, dass der Brandläufer aufgrund der Rauchentwicklung nicht durch den Raum gehen kann, sondern einmal um den Reaktor herumlaufen muss, um auf die andere Raumseite zu gelangen.

Obwohl das Versagen der Automatik der Feuerlöschanlage unerwartet ist, wird sich sein Stressniveau nicht wesentlich ändern, da für die Modellierung des Handlungsablaufs vorausgesetzt wird, dass der Brandläufer das nötige Wissen hat und davon ausgeht, dass er die Feuerlöschanlage manuell öffnen kann und den Raum nicht betreten muss.

Wenn der Brandläufer 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 Brandläufer eine gewisse Zeit benötigt, das Ventil von Hand aufzufahren. Für die benötigte Zeit, um das Ventil mit Hand zu öffnen wird eine gleichverteilte Zufallszeit $t \sim U(60,80)$ s angenommen.

Die daraus folgenden Handlungen erfolgen in Abhängigkeit der aleatorischen Unsicherheiten analog zu den Beschreibungen der Punkte (33) – (38).

(41) Basishandlungen der HL 6.51:

Im Unterschied zur Basishandlung 6.2 liegt in dieser Situation sowohl beim Schichtleiter als auch beim Brandläufer eine erhöhte Stressentwicklung vor. Der Schichtleiter hat jedoch, obwohl er unter erhöhtem Stress steht, die richtige Entscheidung getroffen und das Alarmprotokoll nochmals überprüft, wobei er seinen Fehler entdeckt und den Brandläufer entsprechend anweist. Deshalb unterscheiden sich die Handlungen des Brandläufers hier nicht zur Basishandlung 6.2. Der Unterschied zwischen Basishandlung 6.2 und 6.51 zeigt sich jedoch in der Zeit, wann der Brandläufer die Handlungen durchführt. Der zeitliche Unterschied kann über die Simulationen des Handlungsmodells mit dem Crew-Modul quantifiziert werden.

Die Beschreibung der Handlungen ist analog zur Beschreibung der Handlungen der HL 6.2.

(42) Basishandlungen der HL 6.51:

Wenn die Feuerlöschanlage manuell aktivierbar ist, erfolgt die Löschung durch den Brandläufer mittels dieser Löschanlage.

(43) Abhängigkeit vom Verhalten des BL bei hohem Stress:

Wenn die Feuerlöschanlage nicht manuell aktiviert werden kann und der Brandläufer unter hohem Stress steht, wird die Möglichkeit einer stressbedingten Fehlhandlung berücksichtigt.

Für die Fehlhandlung wird angenommen, dass der Brandläufer unter Zeitdruck und hohem Stress nicht wie normalerweise vorgesehen auf die Löschruppe wartet, sondern versucht, den Raum trotz Verrauchung zu betreten, um einen Löschruchversuch zu unternehmen. Die Wahrscheinlichkeit der stressbedingten Fehlhandlung wird anhand von Daten aus der Betriebserfahrung mit $p = 0.14$ abgeschätzt. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Brandläufer unter Zeitdruck und hohem Stress wie vorgesehen auf die Löschruppe wartet, wird mit $1 - p = 0.86$ angenommen.

(44) Basishandlungen der HL 6.52:

Wenn der Brandläufer wie vorgesehen auf die Löschruppe wartet, werden folgende Basishandlungen ausgeführt:

- Der Brandläufer wartet, bis die Löschruppe den Brandraum erreicht. Die Wartezeit hängt von der Zeitdauer ab, wie lange die Löschruppe benötigt, um den Brandraum zu erreichen.
- Sobald die Löschruppe ankommt, wird sie vom Brandläufer über die vorliegenden Verhältnisse informiert, $t \sim U(30,45)$ s.
- Die Löschruppe holt den Schlauch aus dem Fach, wo er aufbewahrt wird, rollt ihn aus und schließt ihn an den Wasseranschluss an, $t \sim U(60,90)$ s.
- Da sich die Rauchentwicklung im Raum bereits stark entwickelt hat, legt die Mannschaft der Löschruppe ihre Pressluftatemgeräte an, $t \sim U(8,16)$ s.
- Danach begeben sich die Personen der Löschruppe mit ihrem Löschrgerät in die Position, um so schnell wie möglich mit der Löschung beginnen zu können $t \sim U(5,12)$ s.

(45) Basishandlungen der HL 6.53:

In diesem Fall wartet der Brandläufer nicht auf die Löschgruppe, sondern versucht den Raum trotz Verrauchung zu betreten, um einen Löschversuch zu unternehmen. Es wird angenommen, dass er den Raum wegen der schon fortgeschrittenen Rauchentwicklung nicht betreten kann. Allerdings erhält der Brand durch das Öffnen der Tür eine mehr oder weniger große Sauerstoffzufuhr, die sich auf den Brand auswirken kann und die von der Dauer abhängt, wie lange der Brandläufer versucht, seine Möglichkeiten abzuschätzen, den Raum zu betreten. Für die Handlungsliste werden folgende Basishandlungen ausgeführt:

- Der Brandläufer begibt sich von der Ventilstation zurück zur Tür des Brandraums. Unter hohem Stress wird er schneller als normal gehen, so dass in diesem Fall für den Weg eine Zufallszeit $t \sim U(20,35)$ s angenommen wird.
- Wenn der Brandläufer die Tür erreicht und die Löschgruppe noch nicht vor Ort ist, öffnet er trotz sichtbarer Rauchentwicklung die Tür des Brandraums, um seine Möglichkeiten abzuschätzen, den Brand ggf. doch noch mit Handfeuerlöschern löschen zu können. Aufgrund der nun schon länger anhaltenden Rauchentwicklung wird angenommen, dass der Brandläufer den Raum nicht mehr betreten kann. allerdings erhält der Brand durch die geöffnete Tür eine Sauerstoffzufuhr. Sowohl der Zeitpunkt, wann die Tür geöffnet wird als auch die Zeitdauer, wie lange sie durch den Brandläufer geöffnet bleibt, kann einen Einfluss auf die Brandentwicklung haben. Für die Dauer, wie lange der Brandläufer die Brandraumtüre offen hält wird eine Zufallszeit $t \sim U(12,30)$ s angenommen. Dabei kann der Brandläufer die Tür auch mehrmals kurz öffnen und wieder schließen.
- Da er den Raum nicht gefahrlos betreten kann, muss er auf die Löschgruppe warten, die er beim Eintreffen über die Sachlage informiert $t \sim U(30,45)$ s.
- Daraufhin legt die Löschgruppe den Schlauch zur Löschung aus und schließt sie an den Wasseranschluss an. Für diese Arbeiten wird eine Zufallszeit $t \sim U(60,90)$ s angenommen.
- Da bereits Rauch aus dem Brandraum austritt, legt die Mannschaft der Löschgruppe ihre Pressluftatemgeräte an $t \sim U(10,15)$ s.
- Danach begeben sich die Personen der Löschgruppe mit ihrem Löschgerät in die Position, um die Löschung so schnell wie möglich beginnen zu können $t \sim U(6,12)$ s.

Die weiteren Handlungsabläufe hängen von der aleatorischen Unsicherheit ab, ob die Löschausrüstung verfügbar ist. Die von der Verfügbarkeit der Löschausrüstung abhängigen Handlungen werden in den Punkten (38) und (39) beschrieben.

(46) Basishandlungen der HL 6.54:

Wenn die Löschgruppe vor dem Brandläufer den Brandraum erreicht, wird sie die Rauchentwicklung an der Tür erkennen, den Schlauch zur Löschung auslegen und sie an den Wasseranschluss anschließen. Für diese Arbeiten wird eine Zufallszeit $t \sim U(60,90)$ s angenommen.

Da bereits Rauch aus dem Brandraum austritt, legt die Mannschaft der Löschgruppe ihre Pressluftatemgeräte an $t \sim U(10,15)$ s.

Danach begeben sich die Personen der Löschgruppe mit ihrem Löschgerät in die Position, um die Löschung so schnell wie möglich beginnen zu können $t \sim U(6,12)$ s.

Die weiteren Handlungsabläufe hängen von der aleatorischen Unsicherheit ab, ob die Löschausrüstung verfügbar ist, und werden in den Punkten (38) und (39) beschrieben.

(47) Basishandlungen der HL 6.4:

Die Handlungen sind analog zu denen, die unter Punkt (46) beschrieben wurden.

Der in Abb. 5.7 skizzierte Handlungsablauf wurde über die Benutzeroberfläche des Crew-Moduls modelliert und der entsprechende Datensatz erzeugt. Über das Crew-Modul in Verbindung mit MCDET wurden die entsprechenden Handlungsabläufe unter Berücksichtigung der Abhängigkeit von Prozesszuständen und stochastischen Einflüssen simuliert. Im nachfolgenden Abschnitt werden einige Ergebnisse beispielhaft dargestellt, die aus den Simulationsrechnungen des Handlungsmodells abgeleitet wurden.

Durch die Darstellung der Ergebnisse soll demonstriert werden, in welchem Detaillierungsgrad probabilistische Aussagen mit der hier vorgeschlagenen Methodik zur dynamischen Analyse menschlicher Handlungen erhalten werden können und in welcher Form der Einfluss zufälliger Größen auf den Handlungsablauf quantifiziert werden kann.

Für die Zeitverteilungen der einzelnen Basishandlungen wurden hier der Einfachheit halber nur Gleichverteilungen angenommen. Grundsätzlich können, je nach Kenntnisstand,

auch beliebige andere Verteilungen für die Unsicherheiten bzgl. der Ausführungszeiten von Basishandlungen spezifiziert werden, wie z. B. Dreiecks- oder Histogramm-Verteilungen.

5.4 Ergebnisse des Anwendungsbeispiels

Da im Rahmen der Brandbekämpfungsmaßnahme die Löschgruppe auf jeden Fall den Brandraum erreicht und versuchen wird, den Brand unter Kontrolle zu bringen, liegt das Hauptinteresse nicht in der Wahrscheinlichkeit, ob eine Löschung stattfindet oder nicht, sondern vielmehr darin, mit welchen Wahrscheinlichkeiten die Löschung zu welchen Zeiten stattfindet. Die Zeiten spielen insofern eine maßgebliche Rolle, da sie in erster Linie bestimmen, wie schnell der Brand gelöscht werden kann und welche Schädigungen an sicherheitsrelevanten Komponenten durch die Dauer des Brandes auftreten.

Da die Handlungsabläufe von den Prozesszuständen der Brandentwicklung im Brandraum und vor der Tür des Brandraums abhängen, werden die Ergebnisse im Folgenden beispielhaft für folgende Prozesszustände angegeben:

- Rauchentwicklung im Brandraum noch nicht sehr weit fortgeschritten, so dass der Brandraum betreten werden kann und
- Rauchentwicklung vor der Tür nicht erkennbar, im Brandraum jedoch soweit fortgeschritten, dass der Raum vom Brandläufer nicht und von der Löschgruppe nur mit besonderer Ausrüstung betreten werden kann.

5.4.1 Geringe Rauchentwicklung im Brandraum

Die Ergebnisse in diesem Abschnitt beziehen sich auf die Simulationsrechnungen, die für den Prozesszustand einer geringen Rauchentwicklung im Brandraum durchgeführt worden sind. D. h., die Rauchentwicklung im Brandraum ist noch nicht so weit fortgeschritten, so dass der Brandraum vom Brandläufer bzw. der Löschgruppe betreten und der Brand mit dem Handfeuerlöscher bekämpft werden kann.

Die Simulationsrechnungen haben ergeben, dass bei diesem Prozesszustand mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 98 % die Löschung durch den Brandläufer erfolgt, der den Brandraum vor der Löschgruppe erreicht. Mit einer Wahrscheinlichkeit von lediglich 2 % erreicht die Löschgruppe den Brandraum vor dem Brandläufer und führt die Löschung

durch. Da die Rauchentwicklung noch nicht so weit fortgeschritten ist und der Brandraum betreten werden kann, wird die Löschung sowohl vom Brandläufer als auch von der Löschgruppe mit dem Handfeuerlöscher (HFL) ausgeführt.

In der nachfolgenden Abb. 5.8 werden die bedingten Verteilungen der Zeit angegeben, wann der Brandläufer bzw. die Löschgruppe beginnen, den Brand zu löschen. Die Bedingung ist durch den Prozesszustand gegeben, dass der Brandraum betreten werden kann.

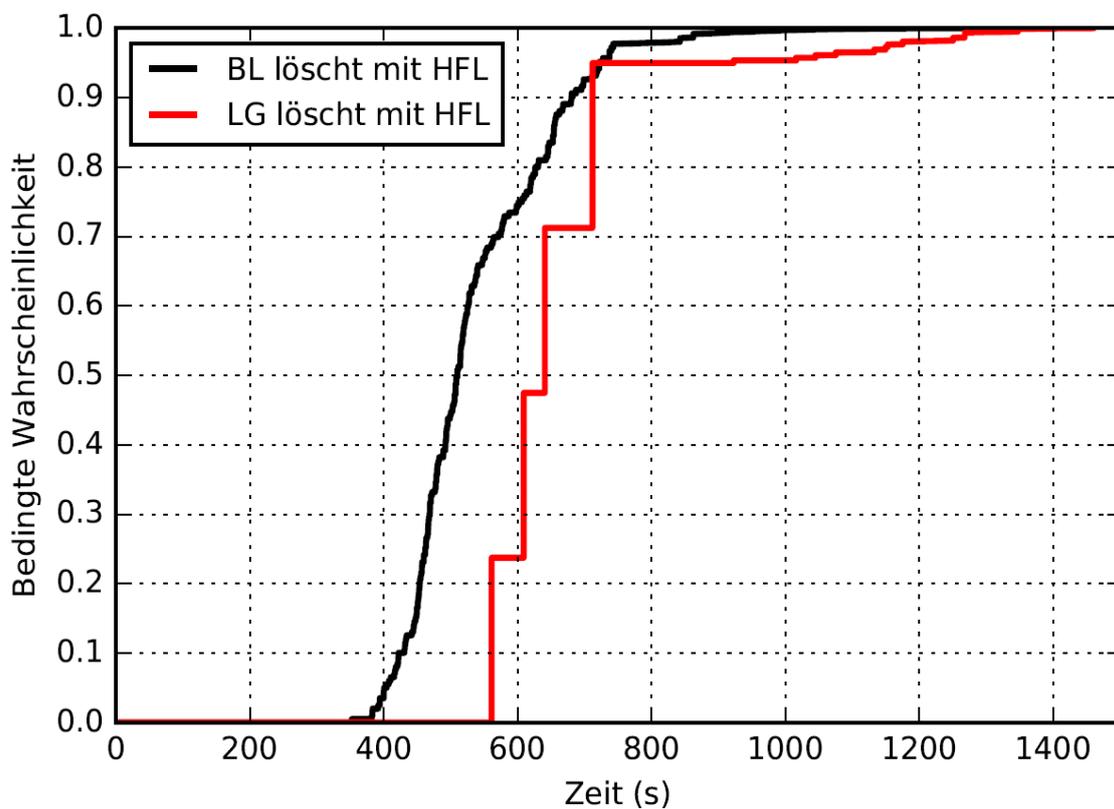


Abb. 5.8 Bedingte Zeitverteilung, wann die Brandlöschung durch den Brandläufer (BL) bzw. der Löschgruppe (LG) beginnt

Aus den Zeitverteilungen in Abb. 5.8 ist ersichtlich, dass die Brandlöschung durch den Brandläufer früher durchgeführt wird als durch die Löschgruppe. Unter der Bedingung, dass der Brandläufer die Löschung durchführt, beträgt die Wahrscheinlichkeit $P = 0,744$, dass die Löschung innerhalb von 6 bis 10 min und mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,198$ zwischen 10 und 12 min nach der Brandentstehung erfolgt. Mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 6 % erfolgt der Löschbeginn durch den Brandläufer zwischen 12 und 21 min.

Im Fall, dass die Löschgruppe die Löschung des Brandes durchführt, erfolgt der Löscheintritt mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,23$ zwischen 9 und 10 min und mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,72$ zwischen 10 und 12 min nach der Brandentstehung. Mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 5 % erfolgt der Löscheintritt durch die Löschgruppe zwischen 12 und 24 min.

Obwohl die hohen Zeiten des Löscheintritts (> 12 min) sowohl beim Brandläufer als auch bei der Löschgruppe mit einer relativ geringen Wahrscheinlichkeit von $P = 0,06$ bzw. $P = 0,05$ auftreten, ist es interessant zu untersuchen, wodurch die hohen Zeiten verursacht werden. Dazu werden im Folgenden die Löscheinzeiten des Brandläufers in Abhängigkeit

- a) von seinem zufälligen Standort, d. h., ob er sich bei der Alarmierung innerhalb oder außerhalb des Kontrollbereichs befindet, und
- b) von der Fehlhandlung des Schichtleiters, der eine falsche Nummer des Brandraums an den Brandläufer und an die Löschgruppe kommuniziert,

dargestellt.

In Abb. 5.9 sind die bedingten Zeiten des Löscheintritts durch den Brandläufer in Abhängigkeit der zufälligen Ereignisse dargestellt, ob sich dieser bei der Alarmierung innerhalb oder außerhalb des Kontrollbereichs befindet und ob der Schichtleiter die Nummer des Brandraums richtig oder falsch weitergibt.

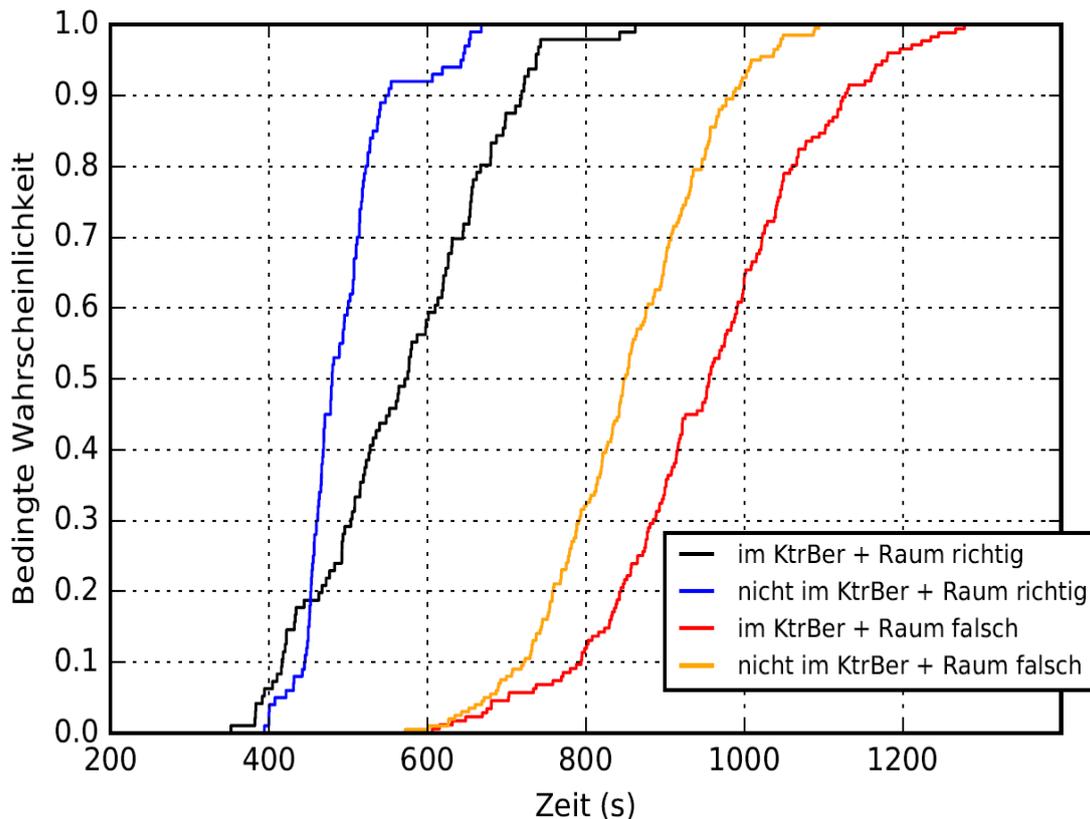


Abb. 5.9 Bedingte Zeitverteilung für den Löschbeginn in Abhängigkeit vom Standort des Brandläufer (BL) und der Fehlhandlung des Schichtleiters (SL)

Im Fall, dass der Schichtleiter dem Personal die korrekte Nummer des Brandraums kommuniziert, ist aus den Verteilungen in Abb. 5.9 ersichtlich, dass der Brandläufer mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 0.8 die Brandlöschung eher beginnen kann, wenn er sich bei der Alarmierung durch den Schichtleiter außerhalb des Kontrollbereichs befindet. Dies liegt daran, dass sich der Brandraum in der Nähe des Eingangs zum Kontrollbereich befindet und durch den Brandläufer in den meisten Fällen eher erreicht wird, als wenn er sich innerhalb des Kontrollbereichs befindet und vom Brandraum weiter entfernt ist. Wenn sich der Brandläufer innerhalb des Kontrollbereichs befindet, erfolgt die Löschung mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 58 % zwischen 6 und 10 min und mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 42 % zwischen 10 und 15 min. Im Fall, dass sich der Brandläufer bei der Alarmierung außerhalb des Kontrollbereichs befindet, erfolgt der Löschbeginn einer Wahrscheinlichkeit von ca. 92 % zwischen 6.5 und 10 min und mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 8 % zwischen 10 und 11,5 min.

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Brandläufer die Löschung des Brandes innerhalb von 10 min nach der Brandentstehung beginnen kann, ist mit 92 % gegenüber 58 % wesentlich höher, wenn er sich außerhalb des Kontrollbereichs aufhält.

Wenn der Schichtleiter die Nummer des Brandraums fälschlicherweise nicht richtig kommuniziert, erkennt man eine deutliche Verzögerung des Zeitpunktes wann die Löschung des Brandes durch den Brandläufer beginnt. Befindet sich der Brandläufer zum Zeitpunkt der Alarmierung außerhalb des Kontrollbereiches, erfolgt der Löschbeginn einer Wahrscheinlichkeit von ca. 67 % zwischen 10 und 15 min und mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 33 % zwischen 15 und 18,5 min. Befindet sich der Brandläufer innerhalb des Kontrollbereiches, erfolgt der Löschbeginn einer Wahrscheinlichkeit von ca. 34,7 % zwischen 10 und 15 min und mit einer Wahrscheinlichkeit von 65,3 % zwischen 15 und 21 min.

Die späteren Zeiten, zu denen der Brandläufer die Löschung des Brandes beginnt, werden insbesondere durch die Fehlhandlung des Schichtleiters verursacht, der dem Brandläufer eine falsche Nummer des Brandraums genannt hat. Die zeitlichen Verzögerungen ergeben sich dadurch, dass sich sowohl der Brandläufer als auch die Löschgruppe durch die Fehlinformation des Schichtleiters zuerst zum falschen Brandraum begeben, dort feststellen, dass kein Brand vorliegt und auf die korrigierte Information warten müssen. In diesem Fall kann sich auch eine erhöhte Stressentwicklung sowohl beim Brandläufer als auch beim Schichtleiter einstellen.

Die Fehlinformation durch den Schichtleiter ist auch die Hauptursache für die späten Löschzeiten bzgl. der Löschgruppe (siehe Abb. 5.8).

5.4.2 Starke Rauchentwicklung im Brandraum

Im Folgenden sollen beispielhaft Ergebnisse für den Prozesszustand dargestellt werden, in dem die Rauchentwicklung im Brandraum soweit fortgeschritten ist, dass der Brandläufer den Raum nicht und die Löschgruppe nur mit besonderer Ausrüstung betreten kann. Für diesen Prozesszustand werden auch Ergebnisse beschrieben, die den Einfluss von Stress auf die Handlungen der Brandbekämpfungsmaßnahme zeigen.

Zunächst wird in Abb. 5.10 untersucht, welchen Einfluss es auf den Zeitpunkt der Brandlöschung durch den Brandläufer hat, ob der Brandraum noch betreten werden kann. Zusätzlich wird noch der Zeitpunkt des Löschbeginns für die Situationen untersucht, dass

der Brandläufer den Raum nicht betreten kann und das Ventil der Feuerlöschanlage nicht manuell zu öffnen ist. In diesem Fall muss der Brandläufer auf die Löschruppe warten, die die Löschung des Brandes mit ihrer Ausrüstung vornimmt.

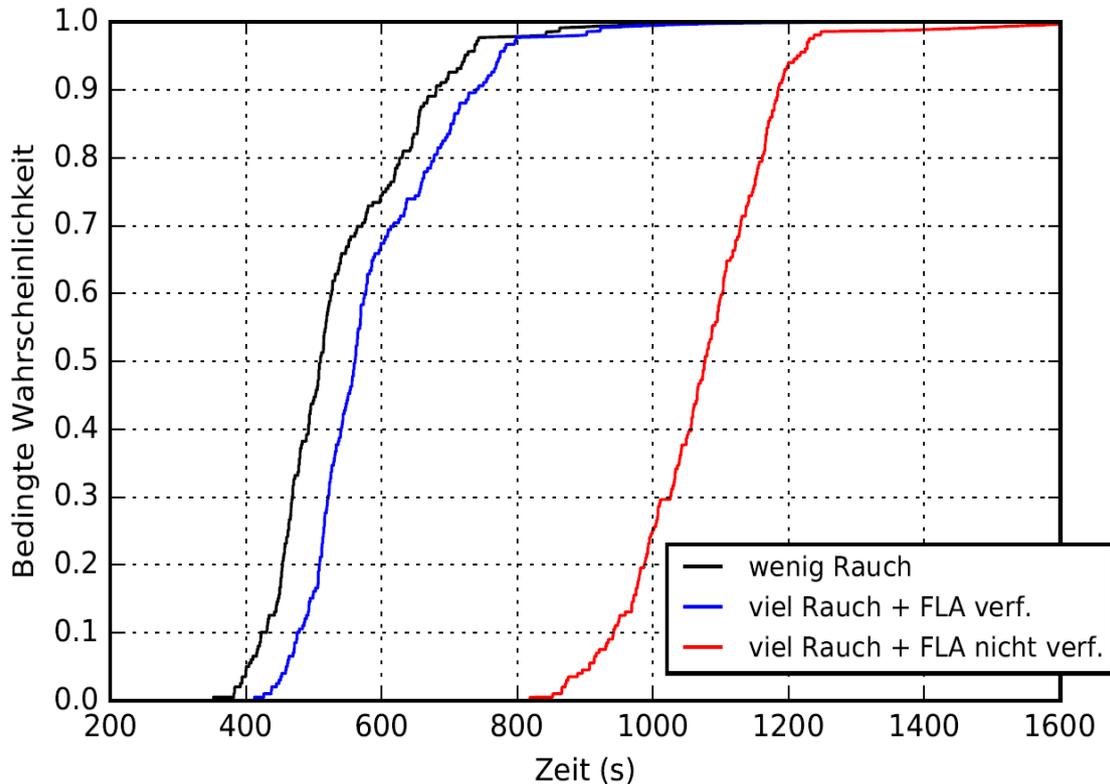


Abb. 5.10 Bedingte Verteilung des Löschrzeitpunkts in Abhängigkeit von der Rauchentwicklung und der Verfügbarkeit der Löschanlage

Im Fall, dass der Brandläufer bei seiner Ankunft am Brandraum nur eine geringe Rauchentwicklung vorfindet und den Brandraum betreten kann, erfolgt die Löschung mit dem Handfeuerlöscher mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % zwischen 5.5 und 12 min nach der Brandentstehung. Die mittlere Löschrzeit liegt bei ca. 8.5 min. Im Fall, dass viel Rauchentwicklung vorherrscht und der Brandraum nicht betreten werden kann, versucht der Brandläufer die Feuerlöschanlage manuell zu aktivieren. Falls dies gelingt, erfolgt die Löschung mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % ca. 50 – 60 s später. D. h., wenn die Feuerlöschanlage verfügbar ist, hat der Zustand, dass der Raum nicht betreten werden kann, keine erhebliche Auswirkung auf den Zeitpunkt des Löschrbeginns.

Falls der Brandläufer den Brandraum nicht betreten kann und die Feuerlöschanlage nicht manuell geöffnet werden kann, muss der Brandläufer auf die Löschrgruppe warten, die die Brandlöschung mit ihrer Ausrüstung durchführt. Diese Situation hat eine signifikante

Auswirkung auf den Zeitpunkt des Löschbeginns. Wenn der Brandläufer auf die Löschruppe warten muss, erfolgt die Löschung durch die Löschruppe zu den in Tab. 5.1 angegebenen Zeiten. In Tab. 5.1 werden bedingte Wahrscheinlichkeiten dafür angegeben, dass die Löschung durch die Löschruppe in bestimmten Zeitintervallen unter der Bedingung stattfindet, dass der Brandläufer zwar vor der Löschruppe den Brandraum erreicht, jedoch auf die Löschruppe warten muss, da er den Brandraum nicht betreten kann und er nicht in der Lage ist, das Ventil der Feuerlöschanlage manuell zu öffnen.

Tab. 5.1 Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen Löschbeginn nach Brandentstehung, wenn der BL den Brandraum nicht betreten und das Ventil der Löschanlage manuell nicht zu öffnen ist

Zeitpunkt des Löschbeginns [min]	Wahrscheinlichkeit
13.5 – 16	0.13
16 – 20	0.81
20 – 25	0.053
25 – 30	0.007

Die Verteilungen in Abb. 5.10 veranschaulichen, welche Bedeutung die Verfügbarkeit der Feuerlöschanlage auf die Löschrzeiten des Brandes haben kann. Die Löschrzeiten des Brandes haben wiederum Einfluss darauf, ob die Bekämpfung des Brandes als erfolgreich (d. h. sicherheitsrelevante Komponenten durch den Brand nicht geschädigt) oder nicht erfolgreich (sicherheitsrelevante Komponente geschädigt bzw. nicht mehr funktionsfähig) bewertet werden kann. Durch den Erfolg der Brandbekämpfung wird die Zuverlässigkeit der Handlung bestimmt. Dieses Beispiel demonstriert, wie wichtig und notwendig die Berücksichtigung zeitlicher Einflüsse bei der Ermittlung der Zuverlässigkeit menschlicher Handlungen sein kann.

Bei den in Tab. 5.1 angegebenen bedingten Wahrscheinlichkeiten könnte die Frage interessieren, mit welcher Wahrscheinlichkeit die zugrunde gelegte Bedingung in dem modellierten Handlungsablauf eintritt. Die Wahrscheinlichkeit der Bedingung, dass der Brandläufer den Brandraum nicht betreten kann und auf die Löschruppe warten muss, da das Ventil der Feuerlöschanlage manuell nicht geöffnet werden kann, setzt sich aus den folgenden Ereignissen zusammen:

- i) Der Brandläufer erreicht vor der Löschruppe den Brandraum,
- ii) der Brandraum kann wegen zu hoher Rauchentwicklung nicht mehr betreten werden, und

iii) das Ventil der Löschanlage kann manuell nicht geöffnet werden.

Während die Wahrscheinlichkeiten von i) und iii) über das Crew-Modul ermittelt werden können, muss die Wahrscheinlichkeit von ii) unter Verwendung eines deterministischen Rechencodes (z. B. FDS – *Fire Dynamics Simulator* /MCG 13/) beispielsweise über eine IDPSA ermittelt werden.

Die Wahrscheinlichkeit von i), dass der Brandläufer vor der Löschanlage den Brandraum erreicht, wurde über die Simulationen des Crew-Moduls mit $P = 0,979$ ermittelt.

Um die Wahrscheinlichkeit von ii) zu ermitteln, müsste im Rahmen einer IDPSA unter Verwendung eines deterministischen Rechencodes die Zeitverteilung ermittelt werden, wann die Prozessgröße des deterministischen Rechencodes, die die Verrauchung im Brandraum anzeigt, den kritischen Wert übersteigt, ab dem der Raum nicht mehr betreten werden kann. Anhand dieser Zeitverteilung und der Zeit, wann der Brandläufer den Brandraum erreicht, kann die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit der dieser den Brandraum nicht mehr betreten kann. Diese Berechnung wurde im Rahmen dieses Vorhabens allerdings nicht explizit durchgeführt, sondern es wurde vereinfacht konservativ angenommen, dass der Brandraum vom Brandläufer mit der Wahrscheinlichkeit 1 nicht mehr betreten werden kann.

Die Wahrscheinlichkeit von iii), dass das Ventil der Feuerlöschanlage nicht manuell geöffnet werden kann, beträgt $P = 0,05$. Diese Wahrscheinlichkeit wurde im Rahmen einer Expertenschätzung ermittelt. Für die oben genannte Bedingung wird somit eine Wahrscheinlichkeit von $P(i) \cdot P(ii) \cdot P(iii) = 0,979 \cdot 1,0 \cdot 0,05 = 4,896 \text{ E-}02$ ermittelt.

Auch wenn die Wahrscheinlichkeit der Bedingung relativ gering ist, konnte durch die oben dargestellten Ergebnisse die Auswirkung der Verfügbarkeit der Feuerlöschanlage auf den Löschanfangzeitpunkt quantifiziert werden. Dies könnte wichtig sein, um Komponenten zu identifizieren, bei denen eine Verbesserung der Zuverlässigkeit den größten Einfluss auf den Erfolg einer Handlung haben.

Im Folgenden soll die Auswirkung der Stressentwicklung auf den Zeitpunkt des Löschanfangs untersucht werden. Für das Modell der Brandbekämpfungsmaßnahme wurde angenommen, dass Schichtleiter und Brandläufer durch eine sehr hohe Stressbelastung betroffen sind, wenn dem Schichtleiter der Fehler unterlaufen ist, dass er einen falschen Raum weitergegeben hat. Um die Möglichkeiten der Modellierung zu demonstrieren,

wurden als Besonderheit Unsicherheiten darüber angegeben, ob es in diesem Fall zu einer extremen Stressbelastung kommt und wie sich die hohe Stressbelastung auf den Schichtleiter und Brandläufer hinsichtlich ihrer Entscheidungen und Handlungsausführungen auswirken.

In der nachfolgenden Abb. 5.11 sind die Löschzeiten durch den Brandläufer und der Löschgruppe in Abhängigkeit davon angegeben, ob der Brandläufer bzw. Schichtleiter ihre Handlungen unter normalem Stress oder hoher Stressbelastung ausführen.

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass sich ein deutlicher Unterschied der Löschzeiten durch die Löschgruppe in Abhängigkeit davon zeigt, ob eine hohe Stressentwicklung vorliegt. Dies ist insbesondere deshalb interessant, da für die Löschgruppe selbst ein nahezu konstantes Stressniveau angenommen wurde. Wie kommt es somit zu den Unterschieden in den Zeitverteilungen der Löschgruppe, obwohl die Löschgruppe gar keinem hohen Stress unterliegt?

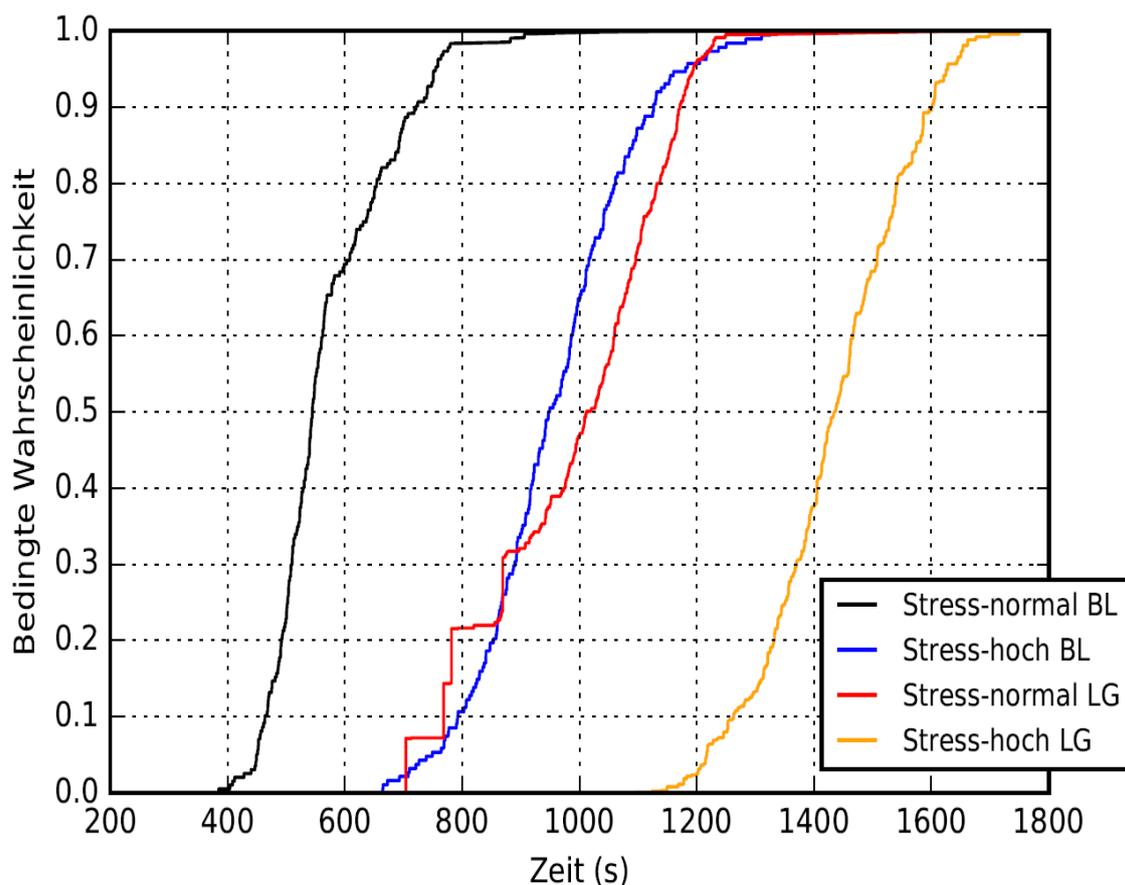


Abb. 5.11 Bedingte Zeitverteilung für den Löschbeginn in Abhängigkeit von Stressentwicklung

Die Unterschiede ergeben sich dadurch, dass zwar das Stressniveau der Löschgruppe nahezu unverändert bleibt, aber der Stress des Schichtleiters durch seinen Fehler erheblich steigen kann. Dadurch werden die Entscheidungen und Ausführungszeiten des Schichtleiters mehr oder weniger stark beeinflusst. Da dieser mit der Löschgruppe interagiert, hat die hohe Stressentwicklung des Schichtleiters indirekt auch Einfluss auf die Löschgruppe. Durch den hohen Stress des Schichtleiters kann die Löschgruppe ggf. falsche Anweisungen erhalten, die möglicherweise durch die Löschgruppe als falsch erkannt werden und im Rahmen der Kommunikation mit diesem korrigiert werden. Dies beeinflusst jedoch den Zeitbedarf der Löschgruppe, den sie zur Löschung des Brandes benötigt. Dieses Ergebnis zeigt, wie wichtig die Berücksichtigung der wechselseitigen Beziehungen und Abhängigkeiten in der menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse ist.

Die Quantile und Mittelwerte der in Abb. 5.11 dargestellten bedingten Verteilungen sind in Tab. 5.2 angegeben.

Tab. 5.2 Quantile und Mittelwert der bedingten Verteilungen für die Zeiten des Löschbeginns durch Brandläufer (BL) und Löschgruppe (LG) in Abhängigkeit von der Stressentwicklung

	5 %-Quantil	50 %-Quantil	95 %-Quantil	Mittelwert	Standardabweichung σ
BL: Stress normal	449	545	753	571	100.3
BL: Stress hoch	743	947	1173	957	128.9
LG: Stress normal	493	1012	1194	987	158.2
LG: Stress hoch	1217	1435	1628	1435	122.4

Anhand der bedingten Verteilungen in Abb. 5.11 zeigt sich, dass sich durch die hohe Stressentwicklung des Brandläufers und des Schichtleiters der Löschbeginn sowohl bzgl. des Brandläufers als auch bzgl. der Löschgruppe signifikant verzögert.

Während der Brandläufer unter normalem Stress eine mittlere Zeit von etwa 9 min von der Brandentstehung bis zum Löschbeginn benötigt, wächst die mittlere Zeit des Brandläufers unter hohem Stress auf ca. 16 min an. Dies ist ungefähr die mittlere Zeit, die die Löschgruppe bei normalem Stress benötigt. Liegt jedoch eine hohe Stressentwicklung

bzgl. des Schichtleiters vor, erhöht sich die mittlere Zeit bis zum Löscheintritt für die Löscheinheit auf ca. 24 min.

Bisher konnte durch die Ergebnisse veranschaulicht werden, dass durch die bedingten Verteilungen der Einfluss von Zufallsgrößen (aleatorische Unsicherheiten) auf die Löscheinzeiten quantifiziert werden kann. Wenn für das Brandszenario kritische Zeitpunkte festgelegt werden können, bis wann die Löschung des Brandes spätestens eingesetzt haben muss, um Schädigungen sicherheitsrelevanter Komponenten im Raum möglichst zu vermeiden, können aus den bedingten Verteilungsfunktionen die Wahrscheinlichkeiten ermittelt werden, mit denen die Brandbekämpfung in den gegebenen Situationen erfolgreich durchgeführt werden.

Zur Veranschaulichung soll angenommen werden, dass sicherheitsrelevante Komponenten im Brandraum einen Brand für 12 min überstehen können und nach 16 min erhebliche Schädigungen eintreten, so dass die im Raum befindlichen Komponenten nicht mehr funktionsfähig sind. Zwischen 12 und 16 min treten mehr oder weniger starke Schädigungen auf, die jedoch noch eine eingeschränkte Funktionalität der Komponente erlauben.

Wenn diese Aussagen vorliegen, lassen sich aus den in Abb. 5.11 angegebenen bedingten Verteilungen folgende Wahrscheinlichkeiten ableiten:

- Wenn eine normale Stressentwicklung vorliegt (diese Situation tritt mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,9925$ auf), beträgt die Wahrscheinlichkeit 84 %, dass die Brandlöschung durch den Brandläufer oder durch die Löscheinheit innerhalb von 12 min nach der Brandentstehung erfolgt. Zu der hohen Wahrscheinlichkeit tragen insbesondere die relativ kurzen Löscheinzeiten des Brandläufers bei, der die Löschung über die manuelle Aktivierung der Feuerlöschanlage einleitet. Mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,115$ erfolgt bei normalem Stress die Brandlöschung zwischen 12 und 16 min und mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,046$ später als 16 min.
- Wenn Schichtleiter und Brandläufer eine hohe Stressentwicklung aufweisen, beträgt die Wahrscheinlichkeit $P = 0,033$, dass die Brandlöschung durch den Brandläufer oder durch die Löscheinheit innerhalb von 12 min nach der Brandentstehung erfolgt. Die Wahrscheinlichkeiten, dass die Brandlöschung unter hohem Stress zwischen 12 und 16 min bzw. später als 16 min nach der Brandentstehung erfolgt, betragen $P = 0,425$ bzw. $P = 0,542$.

Obwohl die hohe Stressentwicklung in dem modellierten Handlungsablauf lediglich mit der geringen Wahrscheinlichkeit von $P = 7,5 \cdot 10^{-3}$ auftritt, zeigen die obigen Ergebnisse dennoch, welchen Einfluss der Faktor Stress auf den Erfolg einer Handlung haben kann. Während unter normalem Stress die Brandbekämpfung mit einer Wahrscheinlichkeit von 84 % erfolgreich durchgeführt wird (d. h. die Löschung innerhalb von 12 min nach der Brandentstehung erfolgt), sinkt die Erfolgswahrscheinlichkeit unter hohem Stress auf 3,3 % ab. Dieses Beispiel soll insbesondere veranschaulichen, wie durch die hier angewendete Methodik der Einfluss des Faktors Stress auf die Zuverlässigkeit einer menschlichen Handlung quantifiziert werden kann.

Der Einwand, dass hoher Stress in dem Handlungsablauf nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit vorkommt und hier kaum Bedeutung hat, relativiert sich sofort, wenn man sich die Situationen vorstellt, in denen Stress mit erheblich höherer Wahrscheinlichkeit auftreten kann.

Die geringe Wahrscheinlichkeit der hohen Stressentwicklung für den Schichtleiter und Brandläufer von $P = 7,5 \cdot 10^{-3}$ ergibt sich im Wesentlichen durch die Tatsache, dass die hohe Stressentwicklung nur als Folge der Fehlhandlung des Schichtleiters auftritt. Die Fehlhandlung des Schichtleiters, d. h. die Angabe eines falschen Raumes, erfolgt im Modell mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,015$. Ob sich nach der Fehlhandlung eine hohe Stressentwicklung bei Schichtleiter und Brandläufer einstellt, ist unsicher und wird im Modell mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,5$ angenommen.

Abschließend soll noch der Einfluss der Entscheidung des Schichtleiters und des Brandläufers auf die Löschzeit untersucht werden. Für das Handlungsmodell wurde angenommen, dass der Schichtleiter unter hohem Stress mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,02$ das Alarmprotokoll, nachdem er vom Brandläufer über die fehlerhafte Benennung des Brandraum in Kenntnis gesetzt wurde, nicht mehr kontrolliert (was er unter normaler Stressbelastung tun würde), sondern so verunsichert ist, dass er dem Brandläufer die Anweisung gibt, auf die Löschgruppe zu warten. Es wird angenommen, dass der Schichtleiter auch unter hoher Stressentwicklung mit hoher Wahrscheinlichkeit von $P = 9,8 \cdot 10^{-1}$ dazu tendiert, das Alarmprotokoll nochmals zu überprüfen, wenn er auf den Fehler aufmerksam gemacht wird.

Ungeachtet der Wahrscheinlichkeiten, dass eine hohe Stressentwicklung in dem modellierten Handlungsablauf mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftritt und die Entscheidung des Schichtleiters nur dann ansteht, wenn dieser unter hohem Stress steht,

soll dennoch untersucht werden, welchen Einfluss diese Entscheidung auf die Löschzeiten und auf den Erfolg der Handlungsmaßnahme hat.

Im Fall, dass der Schichtleiter unter hohem Stress steht und sich für die nochmalige Überprüfung des Alarmprotokolls entscheidet, wird davon ausgegangen, dass er den Fehler entdeckt und dem Brandläufer sowie der Löschgruppe schließlich den korrekten Raum nennt. In dieser Situation kann die Löschung entweder durch den Brandläufer oder durch die Löschgruppe erfolgen, je nachdem, ob die Feuerlöschanlage durch das Öffnen des entsprechenden Ventils manuell ausgelöst werden kann.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Löschzeiten durch den Brandläufer bzw. der Löschgruppe sind in Abb. 5.12 für den Fall angegeben, in dem sich der Schichtleiter für eine nochmalige Überprüfung des Alarmprotokolls entscheidet. In Abb. 5.12 sind nicht, wie zuvor, die bedingten kumulierten Verteilungsfunktionen, sondern alternativ die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen (nicht kumuliert) der Zeiten des Löschbeginns angegeben. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen liefern eine Approximation über die Verteilungsdichte bzgl. der Löschzeiten.

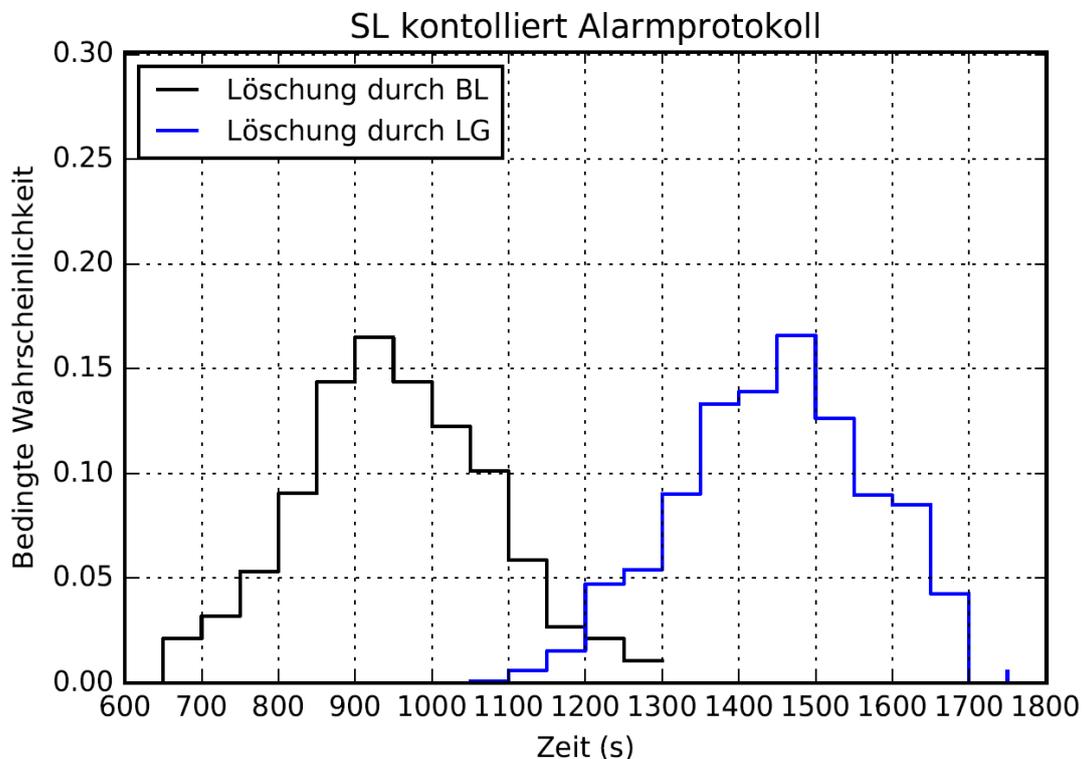


Abb. 5.12 Löschzeiten bzgl. des Brandläufers (BL) und der Löschgruppe (LG), wenn sich der Schichtleiter (SL) unter hohem Stress für eine nochmalige Überprüfung des Alarmprotokolls entscheidet

In Tab. 5.3 sind die zu den Wahrscheinlichkeitsverteilungen gehörenden Mittelwerte sowie die 5 %-, 50 %- und 95 %-Quantile der Löschzeiten angegeben.

Tab. 5.3 Quantile u. Mittelwerte bedingter Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Löschzeiten [s] durch BL und LG, wenn sich der SL unter hohem Stress für nochmalige Alarmprotokollüberprüfung entscheidet

Löschung durch	5 %-Quantil	50 %-Quantil	95 %-Quantil	Mittelwert	Standard-Abweichung σ
BL	743	947	1173	957	129
LG	1219	1459	1646	1449	125

Wie aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Abb. 5.12 und den zugehörigen Quantilen in Tab. 5.3 ersichtlich wird, unterscheiden sich die Löschzeiten durch den Brandläufer und der Löschgruppe signifikant. In der gegebenen Situation erfolgt die Löschung durch die Löschgruppe im Mittel etwa 8 min später als die Löschung durch den Brandläufer. Allerdings ist zu betonen, dass unter der Bedingung der gegebenen Situation (d. h. hohe Stressbelastung des Schichtleiters und seine Entscheidung, das Alarmprotokoll nochmals zu überprüfen) die Wahrscheinlichkeit $P = 0,95$ beträgt, dass die Löschung durch den Brandläufer erfolgt.

Unter der Bedingung, dass der Schichtleiter unter hohem Stress, die nochmalige Überprüfung des Alarmprotokolls unterlässt und sich stattdessen entscheidet, den Brandläufer anzuweisen, auf die Löschgruppe zu warten, erfolgt die Löschung ausschließlich durch die Löschgruppe. Die Löschzeiten der Löschgruppe sind unter dieser Bedingung durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung in Abb. 5.13 angegeben. Die dazugehörigen numerischen Werte sind in Tab. 5.4 angegeben.

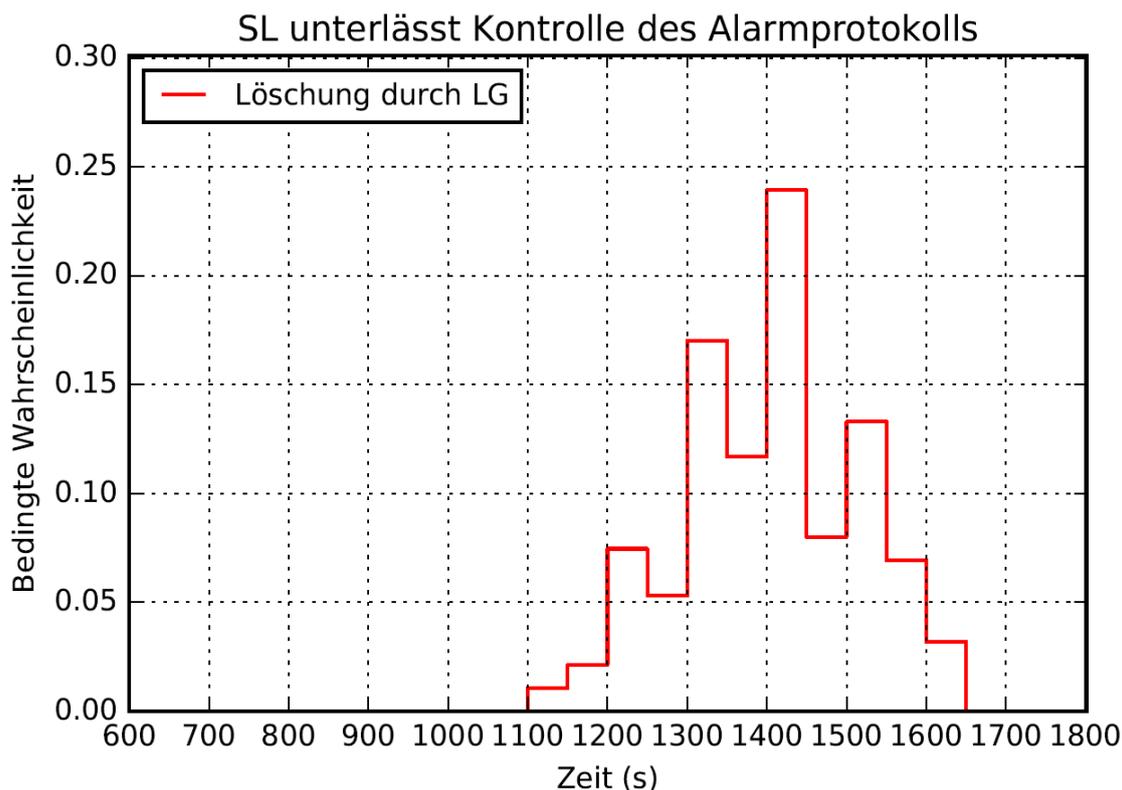


Abb. 5.13 Löschzeiten bzgl. der Löschgruppe (LG), wenn der Schichtleiter (SL) unter hohem Stress die nochmalige Überprüfung des Alarmprotokolls unterlässt

Tab. 5.4 Quantile u. Mittelwerte bedingter Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Löschzeiten [s] durch die LG, wenn der SL unter hohem Stress die Überprüfung des Alarmprotokolls unterlässt und entscheidet, dass der BL auf die LG warten soll

	5 %- Quantil	50 %- Quantil	95 %- Quantil	Mittelwert	Standard- Abweichung
Löschung durch LG	1211	1415	1568	1403	125

Wenn sich der Schichtleiter (SL) entscheidet, dass der Brandläufer (BL) auf die Löschgruppe (LG) warten soll, erkennt man aus den Ergebnissen in Tab. 5.4 gegenüber denen der Tab. 5.3, dass die Brandlöschung durch die Löschgruppe geringfügig eher erfolgt, als wenn der Schichtleiter die Überprüfung des Protokolls durchführt und der Brandläufer die Feuerlöschanlage nicht manuell aktivieren kann. Die mittlere Zeitersparnis liegt bei ungefähr 45 s.

Um den Einfluss der Schichtleiter-Entscheidung bei hohem Stress quantifizieren zu können, soll wie zuvor angenommen werden, dass sicherheitsrelevante Komponenten im Brandraum einen Brand 12 min ohne Beeinträchtigung ihrer geforderten Funktion überstehen können, jedoch nach 16 min erhebliche Schädigungen eintreten, die zur Nichtverfügbarkeit der Komponenten führen. Unter dieser Annahme kann der Einfluss der Schichtleiter-Entscheidung unter hohem Stress aus den aus der Simulation erhaltenen numerischen Werten, die den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Abb. 5.12 und Abb. 5.13 zugrunde liegen, quantifiziert werden. Zur Quantifizierung des Einflusses werden die bedingten Wahrscheinlichkeiten ermittelt, dass der Löszeitpunkt vor 12 min bzw. nach 16 min erfolgt.

- Unter der Bedingung, dass der Schichtleiter unter hohem Stress steht und sich für die Überprüfung des Alarmprotokolls entscheidet, ergibt sich unter Verwendung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Abb. 5.12 eine bedingte Wahrscheinlichkeit von $P = 0,035$, dass die Löschung des Brandes innerhalb von 12 min nach Brandentstehung erfolgt und die Brandbekämpfung somit erfolgreich ist. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass die Löschung nach 16 min erfolgt und die sicherheitsrelevanten Komponenten durch den Brand so stark geschädigt sind, dass die Brandbekämpfung als nicht erfolgreich bewertet wird, beträgt $P = 0,506$.
- Unter der Bedingung, dass der Schichtleiter die Überprüfung des Alarmprotokolls unterlässt und den Brandläufer stattdessen anweist, auf die Lösgruppe zu warten, erfolgt die Löschung des Brandes auf jeden Fall später als 16 min nach der Brandentstehung. Die frühesten Löszeiten, die in diesem Fall berechnet wurden, liegen bei ca. 18 min. Aus Tab. 5.4 ist abzulesen, dass das 5 %-Quantil der Löszeiten bei ca. 20 min liegt.

An dieser Stelle sei nochmals betont, dass die Wahrscheinlichkeit der oben genannten Bedingungen in dem modellierten Handlungsablauf mit $P = 6,56 \text{ E-}03$ bzw. $P = 1,3 \text{ E-}04$ sehr gering sind. Ungeachtet dieser geringen Wahrscheinlichkeiten sollte das Beispiel zur Veranschaulichung dienen, dass die hier angewendete Methodik zur dynamischen Analyse menschlicher Handlungen dazu eingesetzt werden kann, den Einfluss aleatorischer Unsicherheiten auf den Erfolg einer Handlung zu quantifizieren.

Insbesondere sollte durch die Ergebnisbeispiele demonstriert werden, dass durch die Anwendung der dynamischen Analyse nicht nur Erfolgswahrscheinlichkeiten einer Handlung berechnet werden können, sondern zusätzlich detaillierte Wahrscheinlich-

keitsaussagen über die Zeiten ermittelt werden können, wann relevante Handlungen ausgeführt werden.

5.5 Fazit zum Anwendungsbeispiel

Ein wesentlicher Vorteil der angewendeten Methodik besteht darin, dass eine Handlungsmaßnahme als dynamischer Handlungsablauf unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen umfassend und detailliert modelliert und simuliert werden kann.

An dem Anwendungsbeispiel der Brandbekämpfungsmaßnahme wurde demonstriert, in welcher Form eine menschliche Maßnahme als dynamischer Handlungsablauf in Abhängigkeit von Prozesszuständen und zufälligen Einflüssen modelliert werden kann. Dabei wurde gezeigt, wie sich in Abhängigkeit von Prozesszuständen, zufälligen Einflüssen und zeitlichen Wechselwirkungen verschiedene Handlungsabläufe ergeben, die erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der menschlichen Zuverlässigkeitsanalyse haben können.

Anhand der Modellierung der Brandbekämpfungsmaßnahme wurde das Prinzip gezeigt, wie der Faktor Stress als dynamische Größe in einem Handlungsablauf eingebunden werden kann. Bzgl. der Entscheidungen und Handlungsausführungen, die unter hohem Stress erfolgen, können Unsicherheiten bzgl. alternativer Entscheidungsmöglichkeiten und den daraus folgenden Handlungsabläufen berücksichtigt werden. D. h. mit der hier vorgestellten und angewendeten Methodik zur dynamischen Analyse menschlicher Handlungen kann nicht nur der Einfluss von Stress auf Unterlassungsfehler (errors of omission), sondern auch der Einfluss von Stress auf Fehlentscheidungen und auf Ausführungsfehler (errors of commission) modelliert werden. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl der Einfluss Stressentwicklung allgemein als auch der Einfluss getroffener Entscheidungen unter hohem Stress auf die Zuverlässigkeit einer Handlung probabilistisch quantifiziert werden kann.

Es konnte ferner gezeigt werden, dass durch die hier angewendete Methodik eine detaillierte Modellierung menschlicher Handlungen durchgeführt werden kann, wobei relevante Abhängigkeiten, zeitliche Einflüsse, Wechselwirkungen und Unsicherheiten umfassend berücksichtigt werden können. Es wurden Analyseergebnisse vorgestellt, in

denen der Einfluss von Prozesszuständen und aleatorischen Unsicherheiten auf den Zeitpunkt des Löschanfangs quantifiziert wurden, z. B.:

- Quantifizierung des Einflusses einer Fehlhandlung des Schichtleiters auf den Zeitpunkt des Löschanfangs. Die Fehlhandlung des Schichtleiters bestand darin, dass er dem an der Brandbekämpfung beteiligten Personal anstelle der Raumnummer des Brandraums eine falsche Raumnummer kommuniziert hat.
- Quantifizierung des Einflusses auf den Zeitpunkt des Löschanfangs in Abhängigkeit davon, ob eine geringe Rauchentwicklung vorliegt und der Brandraum vom Personal betreten werden kann, oder im Brandraum eine starke Rauchentwicklung vorliegt, die ein Betreten ohne besondere Ausrüstung nicht erlaubt.

Des Weiteren haben die Ergebnisbeispiele gezeigt, dass aus den Auswertungen der dynamischen Analysen, Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen ermittelt werden können, die man mit den konventionellen Methoden der PSA nicht erhalten würde. Zum Beispiel:

- Wenn der Brandläufer bei seiner Ankunft am Brandraum nur eine geringe Rauchentwicklung vorfindet und den Brandraum betreten kann, erfolgt die Löschung mit dem Handfeuerlöscher mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % zwischen 5,5 und 12 min nach der Brandentstehung. Die mittlere Löschanzeit liegt bei ca. 8,5 min. Im Fall, dass viel Rauchentwicklung vorherrscht und der Brandraum nicht betreten werden kann, versucht der Brandläufer die Feuerlöschanlage durch das Öffnen des entsprechenden Ventils manuell zu aktivieren. Falls dies gelingt, erfolgt die Löschung ca. 50 – 60 s später.

Gelingt dies nicht, muss der Brandläufer auf die Löschanne warten, die die Brandlöschung mit ihrer Ausrüstung durchführt. In diesem Fall liegt der Zeitpunkt des Löschanfangs mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,13$ zwischen 13,5 und 16 min, mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,81$ zwischen 16 und 20 min und mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,06$ zwischen 20 und 30 min nach der Brandentstehung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Unfallabläufe, die sich durch übergreifende Einwirkungen in Kernkraftwerken ergeben können, sind durch Wechselwirkungen zwischen den Handlungen des Anlagenpersonals, dem System- und Prozesszustand sowie stochastischen Einflüssen im zeitlichen Ablauf gekennzeichnet. So können bestimmte Prozesszustände Aktionen des Personals hervorrufen, wobei gewisse Handlungen des Personals wiederum unmittelbaren Einfluss auf System- bzw. Komponentenzustände und damit auf den weiteren Prozessablauf haben können. Außerdem kann der Zeitpunkt, wann eine Handlung durchgeführt wird, einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Prozessentwicklung darstellen. Je nachdem, ob eine notwendige Handlung schnell oder erst nach einer längeren Verzögerungszeit betätigt wird, können sich erhebliche Unterschiede im Unfallablauf ergeben, die sich wiederum unterschiedlich stark auf die Stressentwicklung der beteiligten Personen auswirken können.

In der GRS wurde das Crew-Modul entwickelt, mit dem ein Handlungsablauf, der sich durch die arbeitsteilige Ausführung von Handlungen durch die Schichtmannschaft ergibt, als ein dynamischer Ablauf modelliert und simuliert werden kann. Um die Abhängigkeiten von Handlungsabläufen von stochastischen Einflussgrößen berücksichtigen zu können, wird das Crew-Modul in Verbindung mit der in der GRS entwickelten Methode MCDET (Monte Carlo *Dynamic Event Tree*) eingesetzt. Das Analysewerkzeug MCDET kann in Kombination mit einem deterministischen Rechencode zur Durchführung einer integralen deterministisch-probabilistischen Sicherheitsanalyse (IDPSA) angewendet werden. Im Rahmen einer IDPSA können stochastische Einflussgrößen detailliert und umfassend modelliert und deren Einflüsse auf den Prozessablauf realitätsnah berücksichtigt werden. Die Methoden zur Quantifizierung menschlicher Fehler, die bisher überwiegend für die klassische PSA entwickelt wurden, müssen entsprechend weiterentwickelt werden, um in eine dynamische Analyse eingebunden werden zu können.

Das Crew-Modul wurde für das Anwendungsbeispiel eines Brandszenarios mit einer Brandbekämpfungsmaßnahme angewendet. Die Aktionen des in die Brandbekämpfungsmaßnahme eingebundenen Personals wurden dabei als dynamischer Handlungsablauf unter Verwendung der grafischen Oberfläche des Crew-Moduls modelliert. Aus den Informationen des erstellten Modells kann der Eingabedatensatz für die Simulationsrechnungen über ein dazu entwickeltes Programm automatisch erzeugt werden. Die Besonderheit der dynamischen Analyse der Brandbekämpfungsmaßnahme unter Verwendung des Crew-Moduls besteht dabei in der Möglichkeit, Abfolgen von Handlungen unter

Berücksichtigung zeitlicher Einflüsse sowie in Abhängigkeit von Prozesszuständen und zufälligen Einflussfaktoren modellieren zu können.

Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass der Faktor Stress als dynamische Größe in das Handlungsmodell eingebunden werden kann. Bei dem durchgeführten Anwendungsbeispiel wurde insbesondere darauf geachtet zu demonstrieren, in welchem Detaillierungsgrad der Faktor Stress mit der vorgeschlagenen Methodik des Crew-Moduls modelliert werden kann. So können beispielsweise spezielle Bedingungen definiert werden, unter denen sich eine hohe Stressentwicklung einstellt. Andererseits können aber auch Bedingungen spezifiziert werden, indem sich ein hohes Stresslevel wieder auf ein normales Stressniveau bewegt.

An dem Anwendungsbeispiel der Brandbekämpfungsmaßnahme wurde das Prinzip gezeigt, in welcher Form die Stressentwicklung als dynamische Größe in Abhängigkeit von Prozesszuständen und zufälligen Einflüssen in einem Handlungsablauf modelliert werden kann. Es wurde gezeigt, wie es in Abhängigkeit der Stressentwicklung zu unterschiedlichen Entscheidungsfindungen kommt und welche Handlungsabläufe sich aus den Entscheidungen ergeben. Dabei wurden Unsicherheiten bzgl. verschiedener Entscheidungsalternativen berücksichtigt. D. h. mit der hier vorgestellten und angewendeten Methodik zur dynamischen Analyse menschlicher Handlungen kann nicht nur der Einfluss von Stress auf Unterlassungsfehler (errors of omission), sondern auch der Einfluss von Stress auf Fehlentscheidungen und auf Ausführungsfehler (errors of commission) modelliert werden. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl der Einfluss Stressentwicklung allgemein als auch der Einfluss getroffener Entscheidungen unter hohem Stress auf die Zuverlässigkeit einer Handlung probabilistisch quantifiziert werden kann.

Außerdem wurde in dem Modell gezeigt, dass sich hoher Stress unter bestimmten Bedingungen nicht global auf alle beteiligten Personen beziehen muss, sondern auch nur einzelne Personen betreffen kann. Im Modell wurde z. B. angenommen, dass sich hoher Stress nur bei Schichtleiter und Brandläufer einstellt, während die Leute der Löschgruppe aufgrund ihrer besonderen Ausbildung bei ihrem normalen bis leicht erhöhten Stressniveau verbleiben.

Eine weitere Besonderheit der Stressmodellierung bestand darin, dass Unsicherheiten bzgl. der Stressentwicklung berücksichtigt werden können. Dabei kann insbesondere die Unsicherheit bei der Bewertung, ob sich beim Eintreten bestimmter Bedingungen ein hohes Stressniveau einstellt oder nicht, im Modell berücksichtigt werden. Mit der Berück-

sichtigung diese Unsicherheiten können auch verschiedenen Bedingungen (z. B. System- und Prozesszustände, Zustände in der Anlage, Erfolg bzw. Misserfolg vorhergehender Handlungen) bzgl. ihrer Auswirkungen auf die Stressentwicklung gewichtet werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsrechnungen bzgl. des erstellten dynamischen Handlungsmodells der Brandbekämpfungsmaßnahme wurden für verschiedene Fragestellungen ausgewertet. Das Hauptinteresse der Analyse lag nicht in der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, ob eine Löschung stattfindet, sondern vielmehr zu welchen Zeiten und mit welchen Mitteln die Löschung des Brandes einsetzt. Die Zeiten spielen insofern eine maßgebliche Rolle, da sie in erster Linie bestimmen, wie schnell der Brand gelöscht werden kann und welche Schädigungen an sicherheitsrelevanten Komponenten durch die Dauer des Brandes auftreten.

Es wurden Analyseergebnisse vorgestellt, in denen Einflüsse von Prozesszuständen und aleatorischen Unsicherheiten auf den Zeitpunkt des Löschbeginns quantifiziert werden könnten, z. B. der Einfluss der fehlerhaften Kommunikation des Brandraums an das Personal oder der Einfluss des Prozesszustandes, ob der Brandläufer aufgrund der Rauchentwicklung den Brandraum betreten kann.

Des Weiteren haben die Ergebnisbeispiele gezeigt, dass sich aus den Auswertungen der dynamischen Analysen Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen ermitteln lassen, die man mit den konventionellen Methoden der PSA nicht erhalten würde. Mit den aus den Analysen abgeleiteten Verteilungen bzw. bedingten Verteilungen des Zeitpunkts des Löschbeginns können z. B. Wahrscheinlichkeiten ermittelt werden, dass die Brandlöschung vor einem kritischen Zeitpunkt t_{crit} einsetzt. Dabei beschreibt t_{crit} den Zeitpunkt, bis wann die Löschung des Brandes spätestens eingesetzt haben muss, um Schädigungen sicherheitsrelevanter Komponenten im Raum möglichst zu vermeiden. Aus den berechneten Verteilungen bzw. bedingten Verteilungen des Zeitpunkts des Löschbeginns können somit die Wahrscheinlichkeiten ermittelt werden, mit denen die Brandbekämpfung in verschiedenen Situationen erfolgreich durchgeführt werden kann.

Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades, mit dem eine Modellierung menschlicher Handlungen unter der Verwendung der Methode des Crew-Moduls möglich ist, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich die Methode generell zur systematischen Anwendung der dynamischen Analyse menschlicher Handlungen bei Ereignisabläufen

aus übergreifenden Einwirkungen sowie Ereigniskombinationen infolge mehrerer übergreifender Einwirkungen eignet.

Die Methode zur dynamischen Modellierung von Handlungsabläufen über das Crew-Modul und die Anwendung der Methode auf das Anwendungsbeispiel der Brandbekämpfungsmaßnahme wurden auf der internationalen Fachkonferenz PSAM 14 einem breiten Expertenkreis vorgestellt /PES 18a/. Im Rahmen der Diskussionen hat sich gezeigt, dass das Interesse an Methoden zur Durchführung dynamischer Analysen zunehmend größer wird. Dies wurde auch aus der Anzahl der Fachsitzungen zur dynamischen PSA und einer zusätzlichen Sitzung zur dynamischen Human Reliability Analysis (HRA) deutlich.

In der HRA setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, dass zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit detailliertere Modellierungen unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten und zeitlichen Wechselwirkungen notwendig sind. Expertendiskussionen haben gezeigt, dass die Notwendigkeit einer detaillierteren HRA zwar gesehen wird, es aber an den Methoden und Werkzeugen mangelt, mit denen relevante Abhängigkeiten und zeitliche Einflüsse modelliert und analysiert werden können. Damit wird die praktische Umsetzung einer detaillierten Modellierung eingeschränkt.

Das in der GRS entwickelte Crew-Modul liefert in Verbindung mit MCDET (Monte Carlo Dynamic Event Tree) eine Methodik, mit der menschliche Handlungsabläufe in Abhängigkeit von System- bzw. Prozesszuständen, zufälliger Ereignisse, kognitiver Einflüsse und zeitlichen Wechselwirkungen als dynamischer Ablauf modelliert und simuliert werden kann. Eine Methodik, die eine ähnlich detaillierte dynamische Analyse menschlicher Handlungen ermöglicht, wurde auf den einschlägigen Fachkonferenzen bisher noch nicht vorgestellt. Deshalb könnte das Crew-Modul einen wichtigen Beitrag dazu liefern, um die Lücke zwischen der Notwendigkeit einer detaillierten Analyse und einer praktischen Umsetzung zu schließen. Um das Werkzeug einem möglichst großen Nutzerkreis zugänglich zu machen, sind jedoch noch weitere Arbeiten durchzuführen, um das Crew-Modul als benutzerfreundliche Software zur Verfügung stellen zu können.

Außerdem kommen folgende wesentliche Themenbereiche für eine Fortsetzung der Arbeiten zur Erweiterung der Methoden und ihrer Anwendungen in Frage.

Die Methodik sollte auf weitere Beispielfälle angewendet werden, um ihren zu demonstrieren und Erkenntnisse zu gewinnen, bzgl. welcher Aspekte das Crew-Modul noch erweitert werden kann. Denkbar sind beispielsweise Anwendungen bzgl.

- übergreifender Einwirkungen von außen, wie u. a. naturbedingten hydrologischen Einwirkungen mit Überflutungspotenzial, oder
- einem gemeinsamen Auftreten zivilisatorisch bedingter Einwirkungen in Kombination mit kaskadierenden Ereignissen, wie z. B. einem unfallbedingten Flugzeugabsturz mit nachfolgendem Treibstoffbrand auf dem Anlagengelände.

Im Bericht wurden zwei Methoden zur Bewertung der Diagnosezuverlässigkeit aus der Fachliteratur vorgestellt und angewendet. Das ist zum einen der Ansatz nach Swain /SWA 83/ und zum anderen der Ansatz von Weston et. al /WES 87/. Beide Ansätze beruhen auf unterschiedlichen mathematischen Prinzipien, die in Abschnitt 4.1.2 ausgeführt wurden. Im Rahmen einer Weiterführung der Arbeiten sollte untersucht werden, inwieweit die beiden Ansätze mathematisch ineinander überführt bzw. zu einem Gesamtansatz verbunden werden können.

In beiden Bewertungsansätzen kann der Anwender nur den Fehler bewerten, ob die richtige Diagnose rechtzeitig erfolgt. Falsche Diagnosen lassen sich mit diesen Ansätzen nicht bewerten. Da solche fehlerhaften Diagnosen zu Eingriffen führen können, die den Anlagenzustand weiter verschlimmern, sollte die Methodik so weiterentwickelt werden, dass kognitive Fehler im Diagnoseprozess mit der Folge solcher Falschdiagnosen ermittelt und analysiert werden können.

Die in der Methode und im Anwendungsbeispiel genutzten Daten stammen aus ersten Expertenschätzungen der Methodenentwickler (insbesondere stochastische Verteilungen der Ausführungszeiten der Basishandlungen) bzw. aus der amerikanischen Fachliteratur mit Bezug auf ältere amerikanische Anlagen (Diagnosezuverlässigkeit, Zuverlässigkeit der Handlungsausführungen). Im Sinne einer genaueren Modellierung sollten diese Daten in Bezug auf deutsche Anlagen einer Validierung unterzogen werden. Für die Ausführungszeiten könnten Anlagenbegehungen und Befragungen in einer Referenzanlage als Informationsquelle dienen. Für die Zuverlässigkeitsdaten könnten Informationen aus Simulatorstudien, sonstigen Experimenten, der Betriebserfahrung /PRE 16/ und Expertenschätzungen herangezogen werden. Zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit auf der Basis dieser Informationsquellen sollten geeignete Methoden bereitgestellt werden.

Literatur

- /APA 07/ American Psychological Association (APA): APA Dictionary of Psychology, Washington, DC, USA, 2007.
- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, Bekanntmachung vom 3. März 2015, BAnz AT 30.02.2015 B2, https://www.bfe.bund.de/SharedDocs/Downloads/BfE/DE/rsh/3-bmub/3_0_1.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- /DRI 91/ Driskell, J. E., E. Salas: Group Decision Making Under Stress, Journal of Applied Psychology 76, S. 573-578, 1991.
- /EDF 90/ Electricité de France (EDF): EPS 1300 - Etude Probabiliste de Sûreté dans une tranche du Centre de Production Nucléaire de PALUEL (1300 MW_e), Rapport de Synthèse, Mai 1990.
- /FAK 05/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: August 2005, BfS-SCHR-37/05, Salzgitter, Oktober 2005.
- /FAS 03/ Faßmann, W., W. Preischl: Bewertung von Personalhandlungen unter Unfallbedingungen – Methode zur Untersuchung und Bewertung schädlicher Eingriffe des Operateurs, Technischer Fachbericht, GRS-A-3157, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching, Oktober 2003.
- /FAS 10/ Faßmann, W., W. Preischl: Quantitative Bewertung wissensbasierter Handlungen in einer probabilistischen Sicherheitsanalyse, Technischer Fachbericht, GRS-A-3561, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2010.

- /FAS 14/ Faßmann, W.: Methode für die Analyse und Bewertung der Wechselwirkung zwischen Stress und der Zuverlässigkeit wissensbasierten Handelns in der probabilistischen Sicherheitsanalyse, Technischer Bericht, GRS-332, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2014.
- /HAR 05/ Harris, W. C.: Information Processing Changes Following Extended Stress, *Military Psychology* 77, S. 115-128, 2005.
- /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.
- /KAV 05/ Kavanagh, J.: Stress and Performance – A Review of the Literature and Its Applicability in the Military, RAND Corporation, Santa Monica, CA, USA, 2005.
- /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, S. 137-156 2006.
- /LAZ 06/ Lazarus, R. S.: Stress and Emotion, Springer, New York, NY, USA, 2006.
- /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, USA, November 2013.
- /NEA 18/ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA), Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) Working Group on Risk Assessment (WGRISK): Human Reliability Analysis in External Events PSA — Survey of Methods and Practice Task Report, Paris, in Vorbereitung, 2018.

- /PES 06/ Peschke, J., et al.: Methodenentwicklung für die Berücksichtigung menschlicher Eingriffe im Rahmen einer dynamischen PSA der Stufen 1 und 2, GRS, GRS-A-3340, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching, Juni 2006.
- /PES 14/ Peschke, J., et al.: Methodenentwicklung zur Analyse von Personalhandlungen im Rahmen probabilistischer Dynamikanalysen am Beispiel von Brandereignisabläufen mit Brandbekämpfung, GRS, GRS-331, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-944161-11-2, Garching Juni 2014.
- /PES 18/ Peschke, J., et al.: Methodische Weiterentwicklungen und Anwendungen zur probabilistischen Dynamikanalyse, GRS, GRS-520, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, 2018.
- /PES 18a/ Peschke, J., Röwekamp, M.: A Method for Modeling Human Behavior as a Dynamic Process in the Context of External and Internal Hazards, PSAM 14, Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, UCLA Conference Center Los Angeles (USA), September 2018.
- /PRE 16/ Preischl, W., M. Hellmich: Human Error Probabilities from Operational Experience of German Nuclear Power Plants, Reliability Engineering and System Safety 148, S. 44 – 563, 2016.
- /STA 04/ Staal, M.: Stress, Cognition, and Human Performance: A Literature Review and Conceptual Framework, Ames Research Center, Moffett Field, CA, USA, 2004.
- /STA 14/ Staal, M., et al.: Cognitive Performance and Resilience to Stress, psych.colorado.edu/~lbourne/CR.doc, (ohne Jahresangabe), letzter Zugriff am 15.05.2014.
- /STO 94/ Stokes, A., K. Kite: Flight Stress, Avebury Aviation, Aldershot, 1994.

- /SWA 83/ Swain, A. D., H. E. Guttmann: Handbook on Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, Final Report, NUREG/CR-1278, United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC, USA, August 1983.
- /SWA 87/ Swain, A. D.: Accident Sequences Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure, United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC, USA, 1987.
- /WES 87/ Weston, L. M.: Recovery Actins in PRA for the Risk Methods Integration and Evaluation Program (RMEP), Vol. 1, NUREG CR-4834/1, United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC, USA, 1987.

Abkürzungen und Begriffe

Begriff, Abkürzung	Erläuterung
BL	Brandläufer
DWR	Druckwasserreaktor
ELFW	Einsatzleiter der Feuerwehr
EOC	error of commission (Ausführungsfehler)
EOO	error of omission (Auslassungsfehler)
EVA	Einwirkungen von außen
EVI	Einwirkungen von innen
FDS	Fire Dynamics Simulator
FLA	Feuerlöschanlage
HEP	human error probability (menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit)
HFL	Handfeuerlöscher
HL	Handlungslisten
HRA	Human Reliability Analysis (menschliche Zuverlässigkeitsanalyse)
LG	Löschgruppe
IDPSA	integrale deterministisch-probabilistische Sicherheitsanalyse
MCDET	Monte Carlo Dynamic Event Tree
PWR	Pressurized Water Reactor
RF	Reaktorfahrer
SL	Schichtleiter in der Warte
SSC	structures, systems and components (Bauliche Anlagenteile, Systeme und Komponenten)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 5.1	Zuverlässigkeit einer Handlung bei ausschließlicher Berücksichtigung menschlicher Fehler.....	71
Abb. 5.2	Zuverlässigkeitsbestimmung einer Handlung unter Berücksichtigung menschlicher Fehler und des zeitlichen Einflusses	73
Abb. 5.3	Abhängigkeit menschlicher Handlungen vom Prozesszustand	77
Abb. 5.4	Wechselwirkung zwischen Handlungsablauf und Prozesszustand.....	79
Abb. 5.5	Abhängigkeit des Handlungsablaufs von aleatorischen Unsicherheiten.....	80
Abb. 5.6	Wechselwirkungen zwischen Ereignissen aus übergreifenden Einwirkungen und menschlichen Handlungen.....	83
Abb. 5.7	Ablaufdiagramm der Brandbekämpfungsmaßnahme in Abhängigkeit von stochastischen Einflussgrößen, Prozesszuständen, zeitlicher Wechselwirkungen sowie des Faktors Stress als dynamische Größe	88
Abb. 5.8	Bedingte Zeitverteilung, wann die Brandlöschung durch den Brandläufer (BL) bzw. der Löschgruppe (LG) beginnt	115
Abb. 5.9	Bedingte Zeitverteilung für den Löschbeginn in Abhängigkeit vom Standort des Brandläufers (BL) und der Fehlhandlung des Schichtleiters (SL).....	117
Abb. 5.10	Bedingte Verteilung des Löschezitpunkts in Abhängigkeit von der Rauchentwicklung und der Verfügbarkeit der Löschanlage.....	119
Abb. 5.11	Bedingte Zeitverteilung für den Löschbeginn in Abhängigkeit von Stressentwicklung.....	122
Abb. 5.12	Löschzeiten bzgl. des Brandläufers (BL) und der Löschgruppe (LG), wenn sich der Schichtleiter (SL) unter hohem Stress für eine nochmalige Überprüfung des Alarmprotokolls entscheidet.....	126
Abb. 5.13	Löschzeiten bzgl. der Löschgruppe (LG), wenn der Schichtleiter (SL) unter hohem Stress die nochmalige Überprüfung des Alarmprotokolls unterlässt.....	128

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Bestimmung der stochastisch verteilten Zeitaufwände bis zum Erreichen des Orts für die Entgegennahme weiterer Informationen bzw. Anweisungen.....	52
Tab. 4.2	Zu berücksichtigende menschliche Fehler bei der Bereitstellung erforderlichen Personals für den Einsatz im Ereignis	56
Tab. 4.3	Bewertung von Fehlentscheidungen mit der Folge schädlicher Eingriffe	58
Tab. 4.4	Vorgehen bei der Modellierung und Bewertung des Entscheidens	60
Tab. 4.5	Methodik zur Bewertung diagnostischer Aktivitäten bei genau einem Ereignis	62
Tab. 4.6	Diagnose multipler Ereignisse.....	63
Tab. 5.1	Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen Löschbeginn nach Brand-entstehung, wenn der BL den Brandraum nicht betreten und das Ventil der Löschanlage manuell nicht zu öffnen ist.....	120
Tab. 5.2	Quantile und Mittelwert der bedingten Verteilungen für die Zeiten des Löschbeginns durch Brandläufer (BL) und Löschgruppe (LG) in Abhängigkeit von der Stressentwicklung.....	123
Tab. 5.3	Quantile u. Mittelwerte bedingter Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Löscheziten [s] durch BL und LG, wenn sich der SL unter hohem Stress für nochmalige Alarmprotokollüberprüfung entscheidet.....	127
Tab. 5.4	Quantile u. Mittelwerte bedingter Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Löscheziten [s] durch die LG, wenn der SL unter hohem Stress die Überprüfung des Alarmprotokolls unterlässt und entscheidet, dass der BL auf die LG warten soll	128

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

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