

**Verifikation von
Zuverlässigkeitsdaten
für Personalhandlungen
und Datenverbreiterung
im Rahmen der PSA**

Verifikation von Zuverlässigkeitsdaten für Personalhandlungen und Datenverbreitung im Rahmen der PSA

W. Preischl

Januar 2010

Auftrags-Nr.: 865012

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3607R02568 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. 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.

Kurzfassung

Ergebnisse und Aussagesicherheit von PSA Studien werden durch die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit erheblich beeinflusst. Zur probabilistischen Bewertung von Personalhandlungen sind entsprechend den deutschen Vorgaben zur Durchführung einer PSA die Zuverlässigkeitskenngrößen der Methoden ASEP und THERP zu verwenden. Der Umfang an Daten reicht jedoch nicht aus, um alle heute in einer PSA zu untersuchenden Handlungssituationen adäquat zu bewerten. Der Datenbestand ist nicht ausreichend verifiziert und beruht ebenso wie die ausgewiesenen Unsicherheitsbänder auf Expertenschätzungen.

Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben verfolgt das Ziel, Daten aus der deutschen Betriebserfahrung zu den meldepflichtigen Ereignissen mit der Bayes'schen Methode zu ermitteln. Diese bei der Bewertung von verfahrens- und leittechnischen Komponenten etablierte Methode schätzt die Fehlerwahrscheinlichkeit mithilfe der relativen Fehlerhäufigkeit, die in Stichproben aus der Betriebserfahrung beobachtet wird. Um diese Methode für die Bewertung von Personalhandlungen zu nutzen, müssen die Zahl der Gelegenheiten für einen Fehler, die Zahl der Fehler und die wesentlichen leistungsbeeinflussenden Faktoren mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden über 100 Stichproben ermittelt. Mit den daraus abgeleiteten Daten konnte ein Teil der zurzeit empfohlenen Daten überprüft werden und der Datenbestand ließ sich insgesamt erweitern. Die neuen Daten bilden die erste auf der Betriebserfahrung in deutschen Kernkraftwerken beruhende probabilistische Datenbasis auf diesem Arbeitsgebiet.

Abstract

The results and the uncertainty of the results of PSA studies are considerably impacted by the assessment of human reliability. According to the German PSA guidelines the data base of the methodologies ASEP and THERP shall be used to derive error probabilities for human actions. But the amount of these data is not sufficient to evaluate all human actions considered in a modern PSA study adequately. The recommended data are not sufficiently validated and rely as well as the proposed uncertainty bounds on expert judgement.

This research project aimed to derive probabilistic data directly from the experience with notifiable events in German nuclear power plants. The applied method of Bayes is well accepted to calculate error rates and error probabilities of mechanical and electrical components based on error frequencies observed in samples taken from operational experience. To get suitable samples describing human reliability it is necessary to know with sufficient accuracy the number of opportunities to make an error, the number of made errors and the impact of relevant performance shaping factors.

Within this project more than 100 suitable samples were identified. The calculated probabilistic data were used to review recommended human error probabilities as well as to expand the amount of data. They are forming the first data base on human reliability derived from operational experience of German nuclear power plants.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Aufgabenstellung, übergeordnete Zielsetzung	1
2	Wissenschaftliche und technische Einzelziele	4
3	Arbeitsprogramm, Methodik	5
3.1	Teilziel Arbeitspaket 1: Qualitative Auswertung der deutschen Betriebs-erfahrung zu meldepflichtigen Ereignissen	5
3.2	Teilziel Arbeitspaket 2: Quantifizierung der Stichproben aus der verfügbaren deutschen Betriebserfahrung	8
3.3	Teilziel Arbeitspaket 3: Verifikation und Erweiterung des Datenbestandes der im Methodenband des PSA-Leitfadens empfohlenen Methoden	10
3.4	Teilziel Arbeitspaket 4: Vorschläge zur Fortschreibung des Methodenbandes des PSA-Leitfadens.....	10
4	Erhebung von Stichproben aus der deutschen Betriebserfahrung ...	11
4.1	Überblick	11
4.2	Ergebnisse der Stichproben	15
4.2.1	Ausführungsfehler aufgrund von Fehlern bei der Kontrolle der Handlungsausführung	15
4.2.1.1	Stichprobe S1 „Fehlöffnen eines Druckhalterabblaseventils“	15
4.2.1.2	Stichprobe S2 „Ansprechdruck eines Rohrleitungssicherheitsventils zu hoch eingestellt“	16
4.2.1.3	Stichprobe S3 „Anregung des Dieselaggregateschutzes bei der Prüfung der Notstromsignale des Reaktorschutzsystems“	17
4.2.1.4	Stichprobe S4 „Einschränkung der Verfügbarkeit der Reaktorschnellabschaltung“	18
4.2.1.5	Stichprobe S5 „Spannungsausfall an einer Notstromschiene“	18
4.2.1.6	Stichprobe S6 „RESA Auslösung beim Abdichten von Lecks an Kondensatorrohren“	19
4.2.1.7	Stichprobe S7 „Fehlanregung der Notstromsignale in einer Redundanz“	20

4.2.1.8	Stichprobe S8 „Fehlauslösung der RESA bei Prüfungen eines Schnellabschaltsystems“	21
4.2.1.9	Stichprobe S9 „Fehlanregung der Notstromsignale einer Redundanz“	22
4.2.1.10	Stichprobe S10 „Fehlanregung der RESA bei Funktionsprüfung der FD-ISO-Ventile“	23
4.2.1.11	Stichprobe S11 „Ausfall einer 400 V-Notstromschiene“	24
4.2.1.12	Stichprobe S12 „RESA-Auslösung durch versehentliches Betätigen eines Schlüsselschalters“	25
4.2.1.13	Stichprobe S13 „Spannungsausfall an einer 10kV-Notstromschiene“	26
4.2.1.14	Stichprobe S14 „Druckverlust in einem Druckspeicher“	27
4.2.1.15	Stichprobe S15 „RESA nach Fehlfunktion im Kondensatsystem“	28
4.2.2	Ausführungsfehler aufgrund kognitiver Fehler bei der Generierung der Aufgabenstellung	29
4.2.2.1	Stichprobe S16“ Funktionsbeeinträchtigung eines Notstromdieselmotors“	29
4.2.2.2	Stichprobe S17 „Fehlöffnen des Druckhalterabblaseventils“	30
4.2.2.3	Stichprobe S18 „Auslösung der RESA beim Simulieren von Reaktorschutzgrenzwerten“	31
4.2.2.4	Stichprobe S19 „Nichtöffnen eines Sicherheitsventils“	32
4.2.2.5	Stichprobe S20 „Fehlkalibrierung der Reaktorleistung beim Anfahren der Anlage“	33
4.2.2.6	Stichprobe S21 „Ansprechen der Reaktorschutzsignale zum Teilabfahren der Anlage“	34
4.2.2.7	Stichprobe S22 „Spannungsausfall in einer Redundanz des Notstromsystems“	35
4.2.2.8	Stichprobe S23 „Spannungsausfall an einer Schiene des gesicherten Notstromnetzes“	37
4.2.2.9	Stichproben S24 bis S26 „Ausfall einer Notspeisewasserpumpe“	37
4.2.3	Auslassungsfehler	40
4.2.3.1	Stichprobe S27 „Auslösung der Reaktorschutzabschaltung beim Anfahren der Anlage“	40
4.2.3.2	Stichprobe S28 „Handlungsfehler beim Transport unbestrahlter Brennelemente“	41

4.2.3.3	Stichprobe S29 „Anforderung eines Notstromdieselaggregats“	43
4.2.3.4	Stichprobe S30 „Ausfall der Steuerölversorgung der Turbine“	43
4.2.3.5	Stichprobe S31 „Ausfall der Hauptwärmesenke beim Abfahren der Anlage“	45
4.2.3.6	Stichprobe S32 „Druckhalter-Füllstandsüberbrückung bei Abfahren zur Revision nicht betätigt“	46
4.2.3.7	Stichprobe S33 „Auslösung der Reaktorschnellabschaltung bei Prüfungen im Schnellabschaltsystem“	47
4.2.3.8	Stichprobe S34 „Auslösung der Schnellabschaltung beim Anfahren der Anlage“	48
4.2.3.9	Stichprobe S35 „Anforderung eines Notstromdieselaggregats“	49
4.2.3.10	Stichprobe S36 „Fehlöffnen des Druckhalterabblaseventils“	50
4.2.3.11	Stichprobe S37 „Messkanal der Mitte-Loop Füllstandsmesseinrichtung nicht rechtzeitig in Betrieb genommen“	50
4.3	Datentabellen	52
4.3.1	Ausführungsfehler, Fehler bei der Handlungsregulation	52
4.3.2	Ausführungsfehler, fehlerhafte Aufgabenstellung	54
4.3.3	Auslassungsfehler	56
4.3.4	Stichproben mit zu niedrigem Stichprobenumfang	58
5	Bewertung der Daten aus der deutschen Betriebserfahrung	59
5.1	Analyse der Daten aus der deutschen Betriebserfahrung	59
5.1.1	Ausführungsfehler aufgrund von Fehlern bei der Handlungsregulation	59
5.1.2	Ausführungsfehler aufgrund von Fehlern bei der Generierung der Aufgabenstellung	64
5.1.3	Auslassungsfehler, Aufgabenstellung nicht erinnert	65
5.1.4	Auslassungsfehler, schriftliche Anweisung nicht gelesen	67
5.2	Vorschläge zur Fortschreibung des Methodenbandes des PSA- Leitfadens	68
5.3	Vorschläge zur Überprüfung der Methode HCR/ORE	71
5.4	Zusammenfassung und Ausblick	73
6	Literatur	76

Abbildungsverzeichnis

Abb. 5-1	Kognitionsmodell	60
Abb. 5-2	Erreichter Stand und Ausblick	75

1 Einführung in die Aufgabenstellung, übergeordnete Zielsetzung

Die Methodik der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) erfordert Weiterentwicklungen, zu denen an erster Stelle auch die Bereitstellung und die Validierung vorhandener Schätzwerte zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit zählen. Die Dringlichkeit dieser Weiterentwicklungsaufgaben ergibt sich daraus, dass probabilistische Sicherheitsanalysen einerseits zentrale Bedeutung für die Sicherheitsbewertung durch Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden haben, die Genauigkeit dieser Analysen andererseits aber Einschränkungen unterliegt, zu denen auch die Grenzen vorhandener Methoden für die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit beitragen. Dieser Sachstand lässt sich im Detail wie folgt beschreiben.

Die probabilistische Sicherheitsanalyse hat sich weltweit zu einem zentralen Instrument entwickelt, mit dem Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden wie auch Gutachter und Betreiber die Sicherheit von Kernkraftwerken und eventuell erforderliche, weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit beurteilen können. Dabei bildet die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit einen unverzichtbaren Teil, weil die zuverlässige Ausführung von Personalhandlungen erheblich zum Gesamtergebnis einer PSA beiträgt. Folglich hängt die Aussagekraft der Ergebnisse einer PSA entscheidend davon ab, dass die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit

- möglichst alle sicherheitsrelevanten Handlungen einbezieht,
- die Faktoren mit Einfluss auf die Handlungsausführung möglichst umfassend berücksichtigt und
- für die quantitative Bewertung zutreffende Schätzwerte nutzt.

Diese Punkte sind als Sollvorgaben an Bewertungsmethoden zu betrachten.

Der Methodenband des PSA-Leitfadens /MET 05/ empfiehlt Fehlerwahrscheinlichkeiten für die in einer PSA zu berücksichtigenden Handlungen mit der Methode THERP /SWA 83/ und ASEP /SWA 87/ zu ermitteln. ASEP ist ein Verfahren, das durch Vereinfachung aus THERP hervorgegangen ist. In begründeten Ausnahmefällen kann für bestimmte Teilhandlungen eine von den THERP-Daten-Tabellen abweichende Quantifizierung vorgenommen werden. Dies gilt insbesondere, wenn

- eine aus der Betriebserfahrung abgeleitete Fehlerwahrscheinlichkeit vorliegt,

- sich mit einem anderen Verfahren eine Fehlerwahrscheinlichkeiten abschätzen lässt, die dem Analysegegenstand besser gerecht wird als die der THERP Datenbasis.

Als Voraussetzung für den Einsatz anderer Methoden werden u.a. deren Bewährung in der Praxis und Aussagen zur Gültigkeit der Daten dieser Methoden genannt, ohne dass hierzu detaillierte Ausführungen gemacht werden. Bei der Bewertung von Reparaturhandlungen wird explizit auf die Methode HCR/ORE verwiesen /MOI 94/, wenn der Zeitfaktor (für die Handlungsausführung benötigte Zeit, insgesamt verfügbare Zeit) eine Rolle spielt.

THERP unterliegt Beschränkungen, die sich unmittelbar auf die Genauigkeit probabilistischer Sicherheitsanalysen auswirken, in denen diese Methode zum Einsatz kommt. Diese Einschränkungen ergeben sich u. a. aus der Art der Handlungen, die THERP berücksichtigt. Weitere Grenzen der Methode lassen sich auf die Art und die Quellen der Schätzwerte zurückführen, auf denen die quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit beruht:

- THERP erfasst nicht alle Aktionen, die entsprechend den Empfehlungen des Methodenbandes zu berücksichtigen sind.
Zum Anwendungsbereich der Methode gehören Handlungen der Operateure in der Warte sowie als einzige Tätigkeiten vor Ort (z. B. Kalibrierungen und Ventilbedienungen). Eine detaillierte Untersuchung meldepflichtiger Ereignisse zeigt jedoch, dass Fehlhandlungen vor Ort bei vielen Vorkommnissen eine gewichtige Rolle spielen. Durch das Einbeziehen von Notfallmaßnahmen, Reparaturen und von Untersuchungen von Personalhandlungen bei stillstehender Anlage in den Untersuchungsumfang der PSA sind heute in erheblichem Umfang Handlungen vor Ort zu bewerten. Mangels geeigneter Schätzwerte ist dies nur sehr eingeschränkt möglich.
- Die Zuverlässigkeitskenngrößen in THERP sind nicht ausreichend verifiziert.
Die Eingabedaten für die THERP-Methode werden dem Handbuch von Swain und Guttmann /SWA 83/ entnommen. Diese Daten sind relativ alt und stammen überwiegend nicht aus der Kerntechnik. Die Methode THERP nutzt Schätzwerte aus verschiedenen Quellen, um die Zuverlässigkeit menschlichen Handelns zu bewerten. Zu den Quellen gehören unter anderem Untersuchungen aus der Grundlagenforschung mit öffentlich zugänglichen Ergebnissen, vertrauliche Studien aus dem Militärbereich der USA und Experteneinschätzungen. Die Herkunft der einzelnen

Schätzwerte lässt sich in der Regel nicht nachvollziehen. Es ist damit zu rechnen, dass die Entwickler von THERP bei der Übertragung von Daten aus anderen Kontexten und bei der quantitativen Abschätzung von Fehlerwahrscheinlichkeiten die Verhältnisse in US-amerikanischen Anlagen der späten siebziger Jahre vor Augen hatten.

Da die Leistung des Menschen von sehr vielen Faktoren abhängen kann, lässt sich nicht ausschließen, dass sich auch das spezifische gesellschaftliche, politische, wirtschaftliche, bildungsmäßige, professionelle und technologische Umfeld, in dem die Anlagen in verschiedenen Ländern betrieben werden, auf die Handlungszuverlässigkeit auswirken kann. Schätzwerte US-amerikanischer Experten könnten solche spezifischen Verhältnisse reflektieren. Sie könnten somit nicht unabhängig von dem Kontext sein, aus dem sie stammen und für den sie bestimmt sind. Eine Validierung der Daten für die Bedingungen der Kerntechnik gibt es nur punktuell. Die Nutzung der Schätzwerte erfordert mithin auch eine Überprüfung, inwieweit sie für die deutschen Anlagen Gültigkeit besitzen.

Die beschriebenen Einschränkungen von THERP gelten prinzipiell auch für andere Bewertungsverfahren. Die Grundzüge der Methode HCR/ORE wurden 1994 in einer Fachzeitschrift veröffentlicht. Die Daten dieser Methode wurden aus den Ergebnissen von Simulatorversuchen, die an amerikanischen Simulatoren durchgeführt wurden, abgeleitet. Allgemein zugängliche Veröffentlichungen über diese Simulatordatenbasis stehen nicht zur Verfügung. Daraus folgt, dass die Bereitstellung zusätzlicher Daten und die Validierung vorhandener Daten zwei wesentliche Teilaufgaben sind, deren Ergebnisse große Bedeutung für die Fortschreibung des Methodenbandes des PSA-Leitfadens zukommt.

Zu beiden Teilaufgaben sind in den letzten Jahren Vorarbeiten geleistet worden. Die GRS hat in den Vorhaben SR 2288 /GRS 01/ und SR 2414 /GRS 06/ Methoden entwickelt und exemplarisch erprobt, um aus der verfügbaren Betriebserfahrung deutscher Kernkraftwerke Schätzwerte für die Zuverlässigkeit von Handlungen des Kraftwerkspersonals zu gewinnen und sie mit den Schätzwerten aus THERP zu vergleichen. Die hier durchgeführten Arbeiten bauen auf den Erkenntnissen der Vorhaben SR 2288 und SR 2414 auf. Die Arbeitsergebnisse tragen zu einer Validierung und Erweiterung des Bestandes an Zuverlässigkeitskenngrößen zu Personalhandlungen bei und sollen zu einer Fortschreibung des Methodenbandes des PSA-Leitfadens führen.

2 Wissenschaftliche und technische Einzelziele

Das Ziel des Vorhabens war es, die verfügbare Datenbasis zur Zuverlässigkeit von Personalhandlungen zu validieren und zu verbreitern, um damit einen Beitrag zur Fortschreibung des Methodenbandes des PSA-Leitfadens zu leisten. Zur Validierung und Datenverbreiterung werden neue Daten genutzt, die aus der verfügbaren Betriebserfahrung deutscher Kernkraftwerke stammen und mit anerkannten Methoden erhoben wurden. Hierzu wurden die nachstehenden Einzelziele verfolgt.

- Auswertung der verfügbaren Betriebserfahrung deutscher Kernkraftwerke
Die Datenbank BEVOR für meldepflichtige Ereignisse ist bis heute die einzige umfassende Quelle für Betriebserfahrungen in deutschen Kernkraftwerken, die Angaben zu Personalfehlhandlungen enthält und für die Untersuchungen zugänglich ist. Die Datenbank sollte systematisch ausgewertet werden mit dem Ziel, zu einer großen Anzahl bewertbarer Stichproben zu aufgetretenen Fehlhandlungen zu gelangen.
- Quantitative Auswertung der Stichproben
Die Stichproben sollten mit dem bei technischen Komponenten eingesetzten Bayes'schen Verfahren quantitativ ausgewertet werden. Durch eine Gegenüberstellung vergleichbarer Handlungs- und Fehlhaltungstypen sollten zusätzlich die Auswirkungen situativer Einflussfaktoren abgeschätzt werden. Ziel war es, einen möglichst umfangreichen Datenbestand aufzubauen, der durch die verfügbare deutsche Betriebserfahrung abgesichert ist.
- Methodvalidierung und Datenverbreiterung
Die Datenbasis der im Methodenband des PSA-Leitfadens empfohlenen HRA-Methoden THERP /SWA 83/ und HCR/ORE /MOI 94/ sollte mit den aus der deutschen Betriebserfahrung abgeleiteten Fehlhaltungswahrscheinlichkeiten verglichen werden. Ziel war es, diese Methoden zu validieren bzw. auf Mängel und Defizite hinzuweisen und Datenlücken insbesondere zu Tätigkeiten vor Ort durch Daten aus der deutschen Betriebserfahrung zu schließen.
- Fortschreibung des Methodenbandes des PSA-Leitfadens
Abgeleitet aus den Resultaten der Gegenüberstellung von Betriebserfahrung und Bewertungsmethoden sollten Empfehlungen für eine Fortschreibung des Methodenbandes entwickelt werden. Ziel war es, die in Kapitel 1 genannten Schwachstellen bei der probabilistischen Bewertung von Personalhandlungen zu beseitigen.

3 Arbeitsprogramm, Methodik

Das Arbeitsprogramm des Forschungsvorhabens strukturierte sich entsprechend den in Abschnitt 2 beschriebenen vier Teilzielen

- Qualitative Auswertung der deutschen Betriebserfahrung zu meldepflichtigen Ereignissen (Arbeitspaket AP1).
- Aufbau eines Datensatzes zu Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten, der auf Erkenntnissen aus der deutschen Betriebserfahrung beruht (AP2).
- Verifikation und Erweiterung der Daten der im Methodenband vorgeschlagenen Methoden THERP und HCR/ORE (AP3).
- Erarbeitung von Vorschlägen zur Fortschreibung des Methodenbandes des PSA-Leitfadens (AP4).

Im Folgenden werden die zur Realisierung der Teilziele angewendeten Methoden und Vorgehensweisen im Detail dargestellt.

3.1 Teilziel Arbeitspaket 1: Qualitative Auswertung der deutschen Betriebs- erfahrung zu meldepflichtigen Ereignissen

Das Meldeverfahren, das den auszuwertenden Informationen zugrunde liegt, dient in erster Linie der behördlichen Aufsicht über deutsche Kernkraftwerke. Mit ihm sollen die zuständigen Behörden über Ereignisse informiert werden, die entweder aus sicherheitstechnischen oder aus anderen Gründen ein Handeln der Behörde erfordern bzw. erfordern können. Die meldepflichtigen Ereignisse stellen daneben ein wichtiges Hilfsmittel des Erfahrungstransfers dar. Sie sind entsprechend ihrer Aufgabenstellung nicht als Quelle für die Ermittlung quantitativer Zuverlässigkeitsdaten zu Komponenten oder von quantitativen Aussagen zur menschlichen Zuverlässigkeit konzipiert. Daraus ergeben sich für spezifische Fragestellungen, wie quantitative Aussagen zur menschlichen Zuverlässigkeit, erhebliche Einschränkungen sowohl hinsichtlich der Informationstiefe als auch der Vollständigkeit.

Folgende Probleme sind in Betracht zu ziehen:

- Nicht alle Fehler, die im Zusammenhang mit einer Handlung auftraten, sind dokumentiert. Kann z. B. ein Handlungsfehler rechtzeitig korrigiert werden oder weitere Auswirkungen werden durch vorrangige Automaten oder Operateurein-

griffe verhindert, so bleibt das Ereignis in der Regel unterhalb der Meldeschwelle. Da Informationen zu Ereignissen unterhalb der Meldeschwelle nicht in der Datenbank enthalten sind, ist die Gesamtfehlerzahl zu einer Handlung hieraus nicht ermittelbar.

- Die Datenbank enthält bestimmungsgemäß kaum Informationen zu Ereignissituationen, in denen eine Handlung fehlerfrei durchgeführt wurde. Es sind nur Fehlfunktionen und deren Auswirkungen zu melden. Die Häufigkeit, mit der eine bestimmte Handlung ausgeführt wurde, ist anhand dieser Datenbasis nicht abschätzbar.
- Die Ereignisbeschreibungen enthalten oft nur wenige Informationen zu fehlerfördernden Einflussfaktoren. Die Vergleichbarkeit von Handlungsfehlern, die in unterschiedlichen Ereignissituationen auftraten, wird dadurch erheblich erschwert.

Die klassische Ermittlung der Fehlerwahrscheinlichkeit P über die Häufigkeit n/m (Quotient aus Zahl der Fehler und der Zahl der Gelegenheiten für einen Fehler) führt somit ohne geeignete Korrekturen zu nicht zutreffenden Ergebnissen. Deshalb wurden in /GRS 01/ spezielle methodische Entwicklungen durchgeführt, die eine Bewertung dieser Betriebserfahrung ermöglichen. Die dort beschriebene Methode geht von der frequentistischen Interpretation des Wahrscheinlichkeitsbegriffes aus. Die relative Häufigkeit wird jedoch auf der Grundlage einer Stichprobe aus der in der Datenbank dokumentierten Beobachtungen ermittelt. Diese Stichprobe ist so gewählt, dass die genannten Defizite vermieden werden. Die gesuchte Fehlerwahrscheinlichkeit lässt sich dann mit Hilfe der relativen Häufigkeit innerhalb der Stichprobe über das Bayes'sche Verfahren schätzen.

Zur Generierung von bewertbaren Stichproben wurden in /GRS 01/ folgende Lösungsansätze gefunden und erfolgreich erprobt:

- Problem: Häufigkeit einer Handlung im Allgemeinen nicht abschätzbar
Lösungsansatz:
Ausgewählt werden nur Ereignisse zu solchen Fehlhandlungen, für die sich ausreichend gut abschätzen lässt, wie oft die zugehörige Tätigkeit durchgeführt wird. Dies ist vor allem möglich bei periodisch wiederkehrenden Aufgabensituationen oder bei Aufgaben, deren Durchführung dokumentiert wird. Beispiele hierfür sind periodisch wiederkehrende Prüfungen, Instandhaltungsaufgaben, An- und

Abfahrvorgänge, sich wiederholende betriebliche Maßnahmen etc.. In Betracht zu ziehen sind Vorkehrungen des Anlagenbetreibers gegen die Wiederholung eines aufgetretenen Ereignisses. So können z. B. technische Veränderungen eine Wiederholung des beobachteten Ereignisablaufs (d. h. Fehlhandlungen mit unmittelbarer Meldepflicht als Folge) unmöglich machen. Dieser Zusammenhang ist bei der Ermittlung der Gesamtzahl aller Handlungssituationen, in denen eine zu einem meldepflichtigen Ereignis führende Fehlhandlung auftreten kann, zu berücksichtigen.

- Problem: Nicht alle Handlungsfehler führen zu einem meldepflichtigen Ereignis

Lösungsansatz:

Ausgewählt werden nur Handlungen, die im Fehlerfall eindeutig entdeckbar sind und die aufgrund der Kriterien der Meldeverordnung unmittelbar ein meldepflichtiges Ereignis zur Folge haben. Gleichbleibende Meldekriterien sind somit eine Voraussetzung, um eine homogene, statistisch auswertbare Stichprobe zu Personalhandlungen aufzubauen. Eine wesentliche Änderung der Meldekriterien erfolgte 1985. Ab diesem Zeitpunkt weisen die meldepflichtigen Ereignisse hinsichtlich der zugrunde liegenden Meldekriterien eine ausreichende Homogenität auf. Der Auswertzeitraum kann im Einzelfall erweitert werden, wenn die Fehlhandlung z. B. unmittelbar eine Reaktorschnellabschaltung zur Folge hat. Solche Ereignisse waren auch schon vor 1985 meldepflichtig.

- Problem: Fehlerfördernde Einflussfaktoren nur lückenhaft dokumentiert

Lösungsansatz:

Einflussfaktoren sind durch nachträgliche Recherchen zu identifizieren. Da sich die Auswertung auf vorgeschriebene Tätigkeiten beschränkt, können wesentliche Einflussfaktoren in der Regel auch nachträglich noch recherchiert werden. Solche nachträglichen Recherchen sind allerdings mit hohem Aufwand verbunden. Seit einiger Zeit werden daher von der GRS fehlerfördernde Einflussfaktoren systematisch mit erhoben. Sind die fehlerfördernden Einflussfaktoren bekannt, so können durch differenzierte Betrachtungen auch die Gewichte dieser Faktoren ermittelt werden.

Die probabilistische Bewertung der Stichproben kann mit den bei technischen Komponenten eingesetzten mathematischen Methoden erfolgen.

Im Rahmen des Arbeitspunktes 1 wurde die Betriebserfahrung zu den meldepflichtigen Ereignissen entsprechend den oben beschriebenen Vorgehensweisen systematisch

ausgewertet. Bewertbare Fehlhandlungen waren zu identifizieren, die wesentlichen situativen Randbedingungen und die Häufigkeit der Handlung waren, ggf. auch durch nachträgliche Recherchen, zu ermitteln. Als Ergebnis steht damit eine große Anzahl von quantitativ bewertbaren Stichproben zu einem Teil der in der deutschen Betriebserfahrung aufgetretenen Fehlhandlungen zur Verfügung.

3.2 Teilziel Arbeitspaket 2: Quantifizierung der Stichproben aus der verfügbaren deutschen Betriebserfahrung

Die in AP1 ermittelten Stichproben wurden mit der Bayes'schen Methode quantitativ ausgewertet. Diese Vorgehensweise ist bei der Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen für technische Komponenten etabliert. Die Erprobungen in SR 2288 und SR 2414 zeigten, dass diese Methode auch bei Stichproben, die die oben genannten Eigenschaften aufweisen, eingesetzt werden kann.

- Ermittelt werden Erwartungswert und Unsicherheit der durch eine Beta-Verteilung beschriebenen Fehlhandlungswahrscheinlichkeit.
- Der Stichprobenkenntnisstand (repräsentiert durch die Parameter n , m) wird dabei mit einer „nicht informativen“ A-priori-Verteilung entsprechend der Bayes'schen Methode verknüpft. Als „nicht informative“ A-priori-Verteilung wird eine Beta-Verteilung mit den Parametern $a = \frac{1}{2}$, $B = \frac{1}{2}$ verwendet /BOX 73/.
- Der Erwartungswert P der Fehlhandlungswahrscheinlichkeit folgt aus der Zahl der Fehler n und der Zahl der Gelegenheiten für einen Fehler m nach der Gleichung

$$P = (0,5 + n) / (1 + m)$$

- Die 5 % -, 50 %- und 95 %-Fraktilen ergeben sich aus den einschlägigen Tabellen zur F-Verteilung. Hierzu sind die Freiheitsgrade der F-Verteilung zu berechnen, die ihrerseits wieder von n und m der Stichprobe abhängen.

Liegen Stichproben aus anderen Anlagen zu vergleichbaren Handlungen vor, so können diese als Vorinformation in die A-priori-Verteilung einbezogen werden. Hierzu kann die zweite Stufe der Bayes'schen Methode angewendet werden. Es bestehen zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der A-priori-Verteilung aufgrund der Vorerfahrung aus anderen Anlagen.

- Der Mischverteilungsansatz /GRS 96/, der alle zur Bestimmung der Apriori-Verteilung verfügbaren Stichproben gleich gewichtet.
- Der Superpopulationsansatz, der die Stichproben als Repräsentanten einer zu berechnenden beta-verteilten Apriori-Funktion auffasst. D.h. die verfügbare Vorinformation ist selbst eine Zufallsgröße, deren Variabilität durch eine sogenannte Populationsverteilung ausgedrückt wird.

Rechenprogramme zur Anwendung des Superpopulationsansatzes für Fehlerwahrscheinlichkeiten stehen zurzeit noch nicht zur Verfügung. Obwohl dieser Ansatz methodisch vorzuziehen wäre, musste für die hier durchgeführten Arbeiten zur Zusammenführung von Vorerfahrung und anlagenspezifischer Erfahrung der Mischverteilungsansatz gewählt werden.

Zur Beurteilung der Vergleichbarkeit von Stichproben sind ergonomische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Die hier durchgeführten Vergleichbarkeitsuntersuchungen greifen die Vorgehensweisen der Methode THERP auf. Die Methode THERP unterteilt Personalfehlhandlungen in Auslassungs-, Diagnose und Ausführungsfehler. Unter Berücksichtigung von für die Fehlhandlung relevanten Randbedingungen erfolgt eine weitere Differenzierung dieser Fehlhandlungen bis auf die Ebene einzelner Handlungselemente, für die Fehlerwahrscheinlichkeiten angegeben sind. Die Handlungselemente und damit verbundene Fehler sind auf einem Abstraktionsniveau definiert, das es ermöglicht, sehr verschiedene Handlungssituationen mit einer begrenzten Anzahl dieser Elemente zu bewerten. Da Handlungselemente des Typs i in verschiedenen Handlungssituationen auftreten, sind die Wahrscheinlichkeiten entsprechend den in den verschiedenen Handlungssituationen vorliegenden Randbedingungen zu modifizieren. Stichproben werden somit als vergleichbar eingeschätzt, wenn Handlungselement, Fehlerart und fehlerrelevante Randbedingungen übereinstimmen.

Durch eine Gegenüberstellung weitgehend vergleichbarer Handlungen, die aber unter unterschiedlichen situativen Randbedingungen durchgeführt werden, wurden auch Daten zum Einfluss solcher Randbedingungen erhoben. Der im Rahmen von Arbeitspaket 2 erzeugte Bestand an Daten aus der verfügbaren deutschen Betriebserfahrung wurde, wie im Folgenden dargestellt zur Datvalidierung und Datenverbreiterung genutzt.

3.3 Teilziel Arbeitspaket 3: Verifikation und Erweiterung des Datenbestandes der im Methodenband des PSA-Leitfadens empfohlenen Methoden

Die im Arbeitspaket 1 ermittelten Handlungsfehler waren, soweit möglich, mit den im Methodenband des PSA-Leitfadens empfohlenen Methoden THERP und HCR/ORE zu bewerten. Durch Vergleich der Betriebserfahrungsdaten mit den theoretisch ermittelten Werten konnten Erkenntnisse zur Validierung der im Methodenband empfohlenen Methoden gewonnen werden.

Insbesondere bei Handlungen vor Ort war eine solche Gegenüberstellung mangels geeigneter Daten in den vorgeschlagenen Methoden häufig nicht möglich sein. In diesen Fällen wurde untersucht, ob die aus der Betriebserfahrung abgeleiteten Werte in den Datenbestand der vorgeschlagenen Methoden integriert werden können.

Wie in Abschnitt 4 dargestellt, konnten im ausgewerteten Datenbestand BEVOR keine Stichproben identifiziert werden, mit denen sich zeitabhängig Modelle zur Zuverlässigkeitseinschätzung von Diagnoseaufgaben verifizieren lassen. Die Validität der Methode HCR/ORE, die die Fehlerwahrscheinlichkeit auf der Grundlage einer zeitabhängigen postulierten Funktion schätzt, lässt sich somit mit den bisher vorliegenden Stichproben aus der deutschen Betriebserfahrung nicht überprüfen. In Abschnitt 5 wird dargestellt, welche Informationen zu dieser Methode vorliegen sollten, um eine Überprüfung der Tragfähigkeit auch ohne Daten aus der Betriebserfahrung vornehmen zu können.

3.4 Teilziel Arbeitspaket 4: Vorschläge zur Fortschreibung des Methodenbandes des PSA-Leitfadens

An Hand der Erkenntnisse aus Arbeitspaket 3 sollte eine Aussage zur Gültigkeit der im Methodenband des PSA-Leitfadens vorgeschlagenen Bewertungsmethoden für Personalhandlungsfehler erarbeitet werden. Bei Vorliegen von Defiziten (z. B. Methode selbst nicht ausreichend gültig, einzelne Daten einer Methoden nicht gültig, Methode stellt keine Daten zur Verfügung) waren Vorschläge zur Behebung dieser Defizite zu entwickeln, die bei einer Fortschreibung des PSA-Leitfadens in den Methodenband einfließen könnten.

4 Erhebung von Stichproben aus der deutschen Betriebserfahrung

4.1 Überblick

In der GRS-Datenbank zu den meldepflichtigen Ereignissen aus deutschen Kernkraftwerken sind bis zum Stichtag 31.12.2006 für die hier durchgeführten Auswertungen Informationen zu fast 6000 Ereignissen dokumentiert. Erfahrungsgemäß sind in etwa 40 % bis 50 % der Fälle Personalfehlhandlungen an der Entstehung und dem Verlauf der Ereignisse beteiligt. Die Datenbank wurde im Rahmen des Vorhabens systematisch mit Hilfe der in Kapitel 3 beschriebenen Selektionskriterien nach probabilistisch bewertbaren Fällen abgesucht. Hierbei waren auch Ereignisse vor 1985 in Betracht zu ziehen, wenn sich auch nach den heute gültigen Kriterien meldepflichtig sind.

Aufgrund der großen Anzahl an Ereignissen war es erforderlich, in zwei Arbeitsschritten mit unterschiedlichem Tiefgang vorzugehen. Zunächst wurden diejenigen Ereignisse ermittelt, die auf der Grundlage einer ersten Einschätzung die Selektionskriterien „abzählbare Handlung“ und „Fehler führt unmittelbar zur Meldepflicht“ erfüllen könnten. Dieser Arbeitsschritt führte zu insgesamt 126 potentiell für das Vorhaben nutzbaren Ereignissen.

Der zweite Arbeitsschritt hatte die detaillierte Aufbereitung der potentiell nutzbaren Ereignisse zum Ziel. Neben den Informationen aus der GRS-Datenbank zu den meldepflichtigen Ereignissen mussten hierzu auch in größerem Umfang als bei Vorhabensbeginn erwartet Informationen aus Gesprächen mit fachkundigem Anlagenpersonal erhoben werden. Das nachträgliche Erheben von benötigten Informationen ist sehr ressourcenaufwändig, insbesondere auch für das fachkundige Anlagenpersonal. Ein erheblicher Teil dieser Fälle ereignete sich vor vielen Jahren. Die Behandlung im Rahmen des Aufsichtsverfahrens ist seit langem abgeschlossen. Die Erfahrungen aus diesem Vorhaben zeigen, dass eine auf das Ziel „probabilistische Bewertung“ ausgerichtete Rekonstruktion auch noch nach vielen Jahren möglich ist. Sie nimmt allerdings soviel Zeit in Anspruch, dass es im Rahmen des Vorhabens nicht möglich war, alle der 126 vorausgewählten Ereignisse aufzubereiten. Da die GRS seit einiger Zeit im Rahmen ihrer Aufgabe, anlagenübergreifende Aspekte aus den Ereignissen herauszuarbeiten, gezielt auch „Human Factors“ relevante Informationen erhebt (GRS-Datenbank

HUF), ist davon auszugehen, dass sich der beschriebene Rechercheaufwand deutlich reduzieren wird. Am Ende des Vorhabens ergibt sich folgender Bearbeitungsstand

- 77 der 126 vorausgewählten Ereignisse sind bearbeitet worden.
- 45 Ereignisse sind abschließend bearbeitet worden. Darunter waren nur 8 Ereignisse, die sich nachträglich als nicht nutzbar erwiesen haben.
- 32 Ereignisse sind weitgehend untersucht, es besteht aber noch ein Bedarf an zusätzlichen Informationen aus den Anlagen.

Die insgesamt 37 abschließend recherchierten und quantitativ bewerteten Stichproben stammen aus insgesamt 13 deutschen Kernkraftwerken, davon 8 DWR-Anlagen und 5 SWR-Anlagen. Somit sind fast alle deutschen Anlagen in den Stichproben vertreten. Die Zahl der vertretenen Anlagen erhöht sich auf insgesamt 15, wenn in diese Betrachtung auch noch die 32 weitgehend untersuchten Fälle einbezogen werden.

Betrachtet man die Verteilung der Stichproben auf die Anlagentypen DWR und SWR und differenziert weiter nach älteren und neueren Anlagen, so ergibt sich folgendes Bild:

- 22 der abgeschlossenen bewertbaren Stichproben sind aus DWR Anlagen, 15 aus SWR Anlagen.
- Unter Einbeziehung der vorbereiteten Stichproben gleichen sich die Zahlen an.
- Die abschließend bewerteten Stichproben verteilen sich gleichmäßig auf ältere und neuer Anlagen (17 neuere, 18 ältere).
- Unter Einbeziehung der vorbereiteten Stichproben nimmt die Fallzahl aus älteren Anlagen deutlich zu.
- Innerhalb der Gruppe der DWR Anlagen verteilen sich die Fälle in etwa gleichmäßig auf ältere und neuere Anlagen.
- Innerhalb der SWR Gruppe ist die Fallzahl aus älteren Anlagen deutlich höher.

Insgesamt lässt sich aus diesen Zahlen schließen, dass es hinsichtlich der Merkmale DWR, SWR, ältere und neuere Anlagen keine signifikanten Unterschiede bei der Verteilung der Stichproben gibt. Die Abweichungen bei den älteren SWR Anlagen im Vergleich zu den neueren SWR Anlagen kann über die unterschiedliche Zahl der

Anlagentypen (4 ältere SWR, 2 neuere SWR) und die Unterschiede in den Betriebszeiten der Anlagen erklärt werden.

Die in den Stichproben vertretenen Handlungen wurden an unterschiedliche Handlungsorten innerhalb der Anlage durchgeführt. Handlungsorte, an denen Fehler auftraten, waren die Warte, örtliche Leitstände, das Schaltanlagegebäude, das Dieselgebäude und die M-Werkstatt.

Handlungsfehler traten in den Anlagenbetriebszuständen „Stillstand“, „Anfahren“, „Leistungsbetrieb“ und „Abfahren“ auf. Somit sind unter den Stichproben keine Handlungsfehler vertreten, die nach Eintritt eines auslösenden Ereignisses oder eines Störfalls auftraten. Stichproben aus solchen Handlungssituationen sind auch nicht notwendigerweise erforderlich, um den Datenbestand zu verifizieren und zu erweitern. Dies begründet sich wie folgt.

Allgemeine Anerkennung bei der probabilistischen Bewertung von Personalhandlungen hat der Ansatz gefunden, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit für eine Handlung und eine postulierte Fehlerart i abhängt von der Basisfehlerwahrscheinlichkeit für diesen Handlungs-/Fehlertyp und der Wirkung der für diesen Handlungstyp relevanten leistungsbeeinflussenden Faktoren (PSF).

$$P_i = f(P_{Bi}, PSF_1 \dots PSF_n)$$

Handlungstypen sind z. B. das Lesen einer schriftlichen Information oder die Betätigung einer Kommandotaste. Die Basisfehlerwahrscheinlichkeit ist der beste erreichbare Wert für diesen Typ und die unterstellte Fehlerart, d.h. die Fehlerwahrscheinlichkeit unter optimalen Bedingungen. Basisfehlerwahrscheinlichkeiten und Daten zum Einfluss vieler leistungsbeeinflussenden Faktoren können auch aus Stichproben gewonnen werden, die nicht aus Störfallsituationen stammen. Typisch für Störfallsituationen ist die Beanspruchung der Operateure durch Stress, vor allem hervorgerufen durch die emotionale Beanspruchung.

Unter den ausgewählten Stichproben befinden sich keine Handlungsfehler, die unter der Wirkung von extrem hohem Stress auftraten. Solche Situationen treten in der deutschen Betriebserfahrung nur selten auf. Häufiger sind Situationen mit moderat erhöhtem Stress, z. B. aufgrund des hohen Aufgabendrucks. Unter den Stichproben sind auch Fälle, bei denen relativ zuverlässige Handlungstypen unter dem Einfluss sehr feh-

lerfördernder ergonomischer Faktoren auszuführen waren (z. B. Mängel bei der Kennzeichnung von Handlungsobjekten) und demzufolge auch zu sehr hohen Fehlerwahrscheinlichkeiten führten.

Die Methoden THERP und HCR/ORE gehen davon aus, dass die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Diagnose eines Störfalles abhängt von der Zeit, die für diese Aufgabe zur Verfügung steht. (THERP: abhängig von dem dafür zur Verfügung stehenden Zeitbudgets, HCR/ORE: abhängig vom Verhältnis „Im Mittel benötigte Zeit/maximal verfügbare Zeit“). Angaben zum Zeitbedarf für die Diagnose einer Störung oder gar eines auslösenden Ereignisses sind in der deutschen Betriebserfahrung nur selten dokumentiert und auch nachträglich kaum zu rekonstruieren. Fehlerwahrscheinlichkeiten für solche Aufgaben können über die Ergebnisse aus Simulatorstudien verifiziert werden. Zum Diagnosefehlerwahrscheinlichkeitsmodell der Methode THERP liegen inzwischen Ergebnisse aus einigen Simulatorstudien vor, die auf die Validität dieses Modells hinweisen (vgl. u.a. /IRSN 07/ und /La Salle 87/). Auch die Fehlerwahrscheinlichkeiten der Methode HCR/ORE sollen durch Simulatorexperimente abgesichert sein. Allerdings kann diese These zurzeit nicht überprüft werden. In Kapitel 5 wird dargestellt, welche Informationen zu HCR/ORE vorliegen sollten, um die Tragfähigkeit dieser Methode zu überprüfen.

Bei den insgesamt bewerteten Fehlhandlungen wird unterschieden zwischen Auslassungsfehlern und Ausführungsfehlern. Insgesamt liegen deutlich mehr bewertete Ausführungsfehler (25) als Auslassungsfehler (12) vor. Um die Voraussetzungen für einen Vergleich der aus den Stichproben gewonnenen Daten mit anderen Daten, z. B. die der Methode THERP, zu verbessern, wird entsprechend den zugrundeliegenden kognitiven Fehlermechanismen wie folgt weiter differenziert:

- Ausführungsfehler trotz korrekter Aufgabenstellung, d.h. kognitiver Fehler bei der Kontrolle der Handlungsausführung.
- Ausführungsfehler aufgrund von kognitiven Fehlern bei der Generierung der Aufgabenstellung (u.a. falsch erinnert oder falsch verstanden bei mündlicher Kommunikation).
- Auslassungsfehler aufgrund von Gedächtnisfehlern (Vergessen eines Handlungsschrittes) oder Interpretationsfehlern (Prozeduranweisung falsch verstanden).

Im folgenden Abschnitt 4.2 werden die bewerteten Stichproben entsprechend dieser Klassifikation geordnet und im Detail vorgestellt. Soweit möglich wird dem Stichprobenergebnis auch der entsprechende zu verifizierende Wert aus der Methode THERP gegenübergestellt. Teilweise haben die Stichproben auch zu neuen Daten geführt.

Hinsichtlich der Dokumentation der Stichproben ist zu beachten, dass die Details der zugrundeliegenden meldepflichtigen Ereignisse generell vertraulich behandelt werden. Die Stichproben sind daher so dokumentiert, dass keine Rückschlüsse auf das Ereignis selbst, oder die betroffene Anlage oder die handelnden Personen gezogen werden können. Angaben hierzu sind auch nicht erforderlich, um das wissenschaftliche Ziel dieses Vorhabens, Datenverifizierung und Verbreitung, zu erreichen.

4.2 Ergebnisse der Stichproben

4.2.1 Ausführungsfehler aufgrund von Fehlern bei der Kontrolle der Handlungsausführung

Ist das Handlungsziel korrekt gewählt, so können Ausführungsfehler noch dadurch auftreten, dass Fehler bei der Regulation der Handlungsausführung auftreten. Typisch für diese Fehlerart sind Handlungsausführungen, bei dem versehentlich ein im Greifraum befindliches anderes Handlungsobjekt betätigt wird (z. B. Kommandotasten, Steckverbindungen, Schlüsselschalter, Simulationsstifte) oder das Handlungsobjekt selbst falsch betätigt wird (z. B. zu viel, zu schnell, zu langsam, nicht ausreichend lange). Zu diesem Fehlermechanismus liegen die folgenden Stichproben vor.

4.2.1.1 Stichprobe S1 „Fehlöffnen eines Druckhalterabblaseventils“

Nach einer Prüfung von Reaktorschutzsignalen, die die Gebäudeabschlussarmaturen nach Eintritt eines Störfalls schließen sollen, werden die angesteuerten Armaturen durch Handlungsbefehl von der Warte aus wieder in ihre Grundstellung zurückgefahren. Bei dieser Prüfrückstellung betätigte der Operateur versehentlich das Vorsteuerventil, das den Öffnungsvorgang des Druckhalterabblaseventils auslöst. Das Öffnen des Druckhalterabblaseventils ist meldepflichtig. Die Kommandotaste des Vorsteuerventils befindet sich in der Nähe der Kommandotaste der zu betätigenden Gebäudeabschlussarmatur (im Greifraum) und sieht nicht wesentlich anders aus als die

Kommandotaste der Gebäudeabschlussarmatur. Für diese Handlungssituation relevante, fehlerfördernde Faktoren, z. B. durch hohen Aufgabendruck oder Erfahrungsdefizite, lagen nicht vor. Auch die Bedienoberfläche selbst weist ergonomisch günstige Gestaltungsmerkmale auf (Beschriftung, funktionale Gruppierung der Elemente).

Nach dem Ereignis wurde die Kommandotaste des Druckhalterabblaseventils mit einer Schutzabdeckung versehen, so dass dieser Fehler nicht mehr auftreten kann. Die Stichprobe umfasst insgesamt 948 Bedienvorgänge. Der Fehler ist einmal aufgetreten. Ohne die Einbeziehung von Vorerfahrung ergibt sich mit der Bayes'schen Methode ein Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit von $P_{EW} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ mit den Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 1,8 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 1,2 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 4,1 \cdot 10^{-3}$.

Daten zu solchen Ausführungsfehlern werden in Tabelle 12 des Datenbestandes der Methode THERP vorgeschlagen. Für die oben beschriebene Handlungssituation wäre Item 12 (3) zu wählen, d.h. $P_{EW} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 3,3 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 3 \cdot 10^{-3}$).

4.2.1.2 Stichprobe S2 „Ansprechdruck eines Rohrleitungssicherheitsventils zu hoch eingestellt“

Im Rahmen der 5-jährigen Prüfung der Ventile zur Absicherung von Rohrleitungen gegen zu hohen Druck wurde festgestellt, dass der Ansprechdruck eines Ventils zu hoch eingestellt war. Das Ventil wird durch Federkraft geschlossen gehalten. Die Schließkraft der Feder wird über eine Schraubhülse in der M-Werkstatt eingestellt. Diese Hülse war im Zuge der letzten Prüfung und Remontage zu weit eingedreht worden. Da damals nach der Endmontage der Ansprechdruck nicht erneut geprüft wurde, wurde der Fehler erst im darauffolgenden Prüfzyklus entdeckt. Heute wird nach der Remontage des Ventils erneut geprüft, so dass dieser Fehler rechtzeitig entdeckt und behoben werden kann.

Die Position der Schraubhülse muss millimetergenau auf eine vorgegebene Marke eingestellt werden. Im vorliegenden Fall betrug die Abweichung nur 1,7 mm. Die Einstellung erfordert aus ergonomischer Sicht ein hohes Maß an Präzision. Zu berücksichtigende, weitere leistungsbeeinflussende Faktoren konnten nicht festgestellt werden. Die nachträglichen Recherchen führten zu insgesamt 913 vergleichbaren Einstellvorgängen. Bisher trat dieser Fehler nur einmal auf. Die Stichprobe charakterisiert

manuelle Einstellvorgänge, bei denen mit großer Präzision auf eine vorgegebene visuell wahrzunehmende Marke eingestellt werden muss. Ausgehend von dieser Stichprobe ergibt sich für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler ein Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit von $P_{EW} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Beta-Verteilung $P_{5\%} = 1,9 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 1,3 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 4,3 \cdot 10^{-3}$). Für diesen Handlungstyp (manuelles Einstellen auf eine visuell wahrzunehmende Marke, große Genauigkeit erforderlich) und den dabei aufgetretenen Fehler „zu große Abweichung“ werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.1.3 Stichprobe S3 „Anregung des Dieselaggregateschutzes bei der Prüfung der Notstromsignale des Reaktorschutzsystems“

Bei der Prüfung der Notstromsignale werden die Teilfunktionen „Lastabwurf“, „Dieselstart und Hochlauf“ und „Stufenweises Belasten der Notstromschiene“ geprüft. Nach dem Lastabwurf sowie dem Hochlauf des Diesels muss von der Warte aus (Wandtafel) das Dieselbelastungsprogramm mittels einer Kommandotaste gestartet werden. Hierfür stehen ca. 7 Sekunden, gerechnet ab dem Augenblick an dem die Freigabe hierfür vorliegt, zur Verfügung. Wird das Dieselbelastungsprogramm zu spät gestartet, so wird der Notstromdiesel über seinen Aggregateschutz abgeschaltet. Dieser Ablauf ist meldepflichtig. Hilfsmittel zur Kontrolle der Zeit sind nicht vorhanden und auch nicht erforderlich. Der Operateur wartet auf das Freigabesignal und soll dann sofort das Dieselbelastungsprogramm starten.

Der Handlungsfehler „Kommandotaste zu spät betätigt“ ist insgesamt zweimal aufgetreten. Nach dem zweiten Auftreten wurde das entsprechende Aggregateschutzkriterium so verändert, dass mehr Zeit zum Reagieren zur Verfügung steht. Die Stichprobe charakterisiert Handlungen, bei denen kurz nach der visuellen Wahrnehmung einer Information eine Kommandotaste zu betätigen ist. Bis auf die vergleichsweise enge Zeitspanne zwischen Erkennen und Ausführen sind in dieser Handlungssituation keine weiteren leistungsbeeinflussenden Faktoren zu berücksichtigen.

Die Stichprobe „Kommandotaste zu spät betätigt, kurze Zeitspanne zwischen Erkennen und Bedienen“ umfasst insgesamt 608 vergleichbare Vorgänge. Bei 2 Fehlern ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 4,1 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Beta-Verteilung: $P_{5\%} = 9 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 3,5 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 9 \cdot 10^{-3}$). Für diesen

Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.1.4 Stichprobe S4 „Einschränkung der Verfügbarkeit der Reaktorschnellabschaltung“

Vor der Durchführung von Funktions- und Unterkritikalitätsprüfungen der Steuerstäbe während der Anlagenrevision sind Simulationen im Reaktorschutzsystem vorzunehmen, um der Möglichkeit von Fehlauflösungen vorzubeugen. Beim Einbringen der Simulationsstifte vor Ort wurde versehentlich eine Simulation an einer benachbarten Baugruppe vorgenommen. Dadurch war das Schnellabschaltkriterium, an dessen Generierung diese Baugruppe beteiligt ist, nur eingeschränkt verfügbar. Eine solche Einschränkung ist meldepflichtig.

Die Frontplatten der beiden Baugruppen (zu simulierende und benachbarte Baugruppe) sind vergleichbar gestaltet. Die Baugruppenplätze im Schrank sind gekennzeichnet. Die zu verwendende Arbeitsunterlage verweist auf den korrekten Baugruppenplatz. Die fehlerhaft bestückte Simulationsbuchse befindet sich im Greifraum, so dass ein Fehler bei der Handlungsregulation zum Einstecken in die falsche Buchse führen kann. Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Einbringen eines Simulationsstiftes in eine Baugruppe“ und die Fehlerart „Einbringen in die falsche Buchse“. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass sich beide Buchsen im Greifraum der handelnden Person befinden und gleich konstruiert und angeordnet sind. Weitere leistungsbeeinflussende Faktoren sind in dieser Handlungssituation nicht zu berücksichtigen.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 48 Gelegenheiten für diesen Fehler. Der Fehler ist einmal aufgetreten. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 3,1 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 3,6 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 2,4 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 7,8 \cdot 10^{-2}$). Für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.1.5 Stichprobe S5 „Spannungsausfall an einer Notstromschiene“

In Zusammenhang mit der regelmäßigen Prüfung der Notstromdieselaggregate ist auch ein Lastlauf vorgesehen. Hierzu wird das laufende Aggregat auf die Notstrom-

schiene geschaltet nachdem die Synchronisationsautomatik die Phasenverschiebung zwischen Notstromschiene und Notstromgenerator abgeglichen hat. Die Prüfarbeiten werden durch einen Fachmann vor Ort am Dieselleitstand des zu prüfenden Aggregates durchgeführt. Zur Einleitung der Synchronisation hat der Operateur am Leitstand den entsprechenden Drehschalter von der Position 0 auf die Position 1 zu drehen.

Unterhalb dieses Drehschalters befindet sich ein zweiter baugleicher Drehschalter, mit dem der Dieselgeneratorschalter bedient wird. Der Operateur verwechselte diese beiden Schalter und schloss versehentlich den Dieselgeneratorschalter. Da die Phasenlagen noch nicht abgeglichen waren, sprachen die Kurzschlussseinrichtungen der Notstromschiene an und schalteten diese komplett frei. Der Ausfall einer Notstromschiene ist meldepflichtig.

Beide Schalter sind durch Beschriftung gekennzeichnet. Die Tätigkeit ist hoch geübt und wird ohne schriftliche Unterlagen durchgeführt. Die Recherchen ergaben, dass ein Fehler bei der Handlungsregulation aufgetreten ist. Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Bedienen eines Drehschalters“ und der Fehlerart „falschen Drehschalter betätigt“. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass sich beide Schalter im Greifraum der handelnden Person befinden und gleich konstruiert sind. Weitere leistungsbeeinflussende Faktoren sind in dieser Handlungssituation nicht zu berücksichtigen.

Die Stichprobe umfasst 1332 Gelegenheiten für diesen Fehler. Der Fehler ist einmal aufgetreten. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 1,3 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 8,9 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 2,9 \cdot 10^{-3}$). Für den Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler wird in THERP ein Erwartungswert von $3,7 \cdot 10^{-3}$ vorgeschlagen (Tabelle 12, Item (2), $P_{5\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 3 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 9 \cdot 10^{-3}$).

4.2.1.6 Stichprobe S6 „RESA Auslösung beim Abdichten von Lecks an Kondensatorrohren“

Beim Auftreten von kleineren Leckagen, durch die Wasser aus dem Nebenkühlwassersystem über undichte Kondensatorrohre in das Kondensatorsystem übertritt, muss der betroffene Bereich des Kondensators abgesperrt werden, um danach die Schadensbehebung vornehmen zu können (Verschließen der undichten Kondensatorrohre). Die

Arbeiten können nur bei Teillastbetrieb durchgeführt werden, da hierzu ein Teil des Kondensators abgesperrt werden muss.

Zur Wiederinbetriebnahme des reparierten Kondensatorteils ist u.a. eine Entleerungsarmatur vom Bedienpult in der Warte zu schließen. Bei diesem Bedienvorgang schloss der Operateur versehentlich eine Absperrarmatur im noch in Betrieb befindlichen Teil des Kondensators. Hierdurch stand die Hauptwärmesenke nicht mehr zur Verfügung. Die Reaktorschnellabschaltung (RESA) wurde ausgelöst. Eine RESA Auslösung ist meldepflichtig.

Die Recherchen ergaben, dass ein Fehler bei der Handlungsregulation aufgetreten ist. Die Kommandotasten der zu bedienenden und der fälschlich bedienten Armatur liegen am Leitstand dicht beieinander (im Greifraum des Operateurs). Mögliche Auswahlfehler sollen durch ergonomische Gestaltungsmerkmale verhindert werden. (Kennzeichnung, Anordnung, Visualisierung der Struktur des Gesamtsystems durch Fließbilddarstellung). Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Bedienen einer Kommandotaste am Leitstand“ und der Fehlerart „falsche Taste betätigt“. Das Pultsegment ist ergonomisch gestaltet. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass sich beide Tasten im Greifraum des Operateurs befinden und gleich konstruiert sind. Weitere leistungsbeeinflussende Faktoren sind in dieser Handlungssituation nicht zu berücksichtigen.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 400 Gelegenheiten für diesen Fehler. Der Fehler ist einmal aufgetreten. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich damit zu $P_{EW} = 3,7 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 4,4 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 2,9 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 9,7 \cdot 10^{-3}$). Für den Handlungstyp und die dabei aufgetretene Fehlerart wird in THERP ein Erwartungswert von $1,3 \cdot 10^{-3}$ vorgeschlagen (Tabelle 12, Item (4), $P_{5\%} = 5 \cdot 10^{-5}$, $P_{50\%} = 5 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 5 \cdot 10^{-3}$).

4.2.1.7 Stichprobe S7 „Fehlanregung der Notstromsignale in einer Redundanz“

Die Funktion der Messumformer des Reaktorschutzsystems zur Überwachung der Spannung an den Notstromschienen wird regelmäßig geprüft. Die Spannungsüberwachung jeder Notstromschiene ist dreikanalig aufgebaut. Die Notstromsignale einer Redundanz werden angeregt, wenn mindestens 2 der 3 Messumformer eine zu tiefe Spannung messen. Die Messumformer einer Redundanz sind nacheinander zu prüfen.

Ein zu prüfender Messumformer wird zunächst durch Öffnen der Trennklammern vor Ort am Leittechnikschrank von der Notstromschiene abgetrennt. Damit wird eine 1 von 3 Anregung ausgelöst, die aber noch keine Auslösung der Notstromsignale für die Redundanz nach sich zieht. Nach der Abtrennung ist das Kabel mit der Prüfspannung in die Prüfbuchse auf der Frontplatte des Messumformers einzustecken. Nach Abschluss der Prüfung ist unmittelbar mit dem nächsten Messumformer fortzufahren. Die Messumformer einer Redundanz sind nebeneinander im gleichen Schaltschrank angeordnet.

Beim hier beschriebenen Ereignis schloss der Operateur das Prüfkabel versehentlich an die Prüfbuchse des benachbarten Messumformers an. Dies führte zum Ausfall dieses Messumformers und damit zur Fehlauflösung der Notstromsignale dieser Redundanz. Die Auslösung von Notstromsignalen ist meldepflichtig.

Die Stichprobe charakterisiert Tätigkeiten, bei denen Kabel an Buchsen von Leittechnikfrontplatten anzuschließen sind. Die Recherchen ergaben, dass ein Fehler bei der Handlungsregulation dazu führte, dass das Kabel an die Nachbarbaugruppe angeschlossen wurde. Die Tätigkeit ist hochgeübt. Die Prüfbuchsen der 3 Kanäle sind mit verschiedenen Farben gekennzeichnet. Fehlerfördernd wirkte sich aus, dass sich die Buchsen im Greifraum des Operateurs befinden, gleich konstruiert und auf den Frontplatten gleich angeordnet sind. Weitere leistungsbeeinflussende Faktoren sind in dieser Handlungssituation nicht zu berücksichtigen.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 1512 Gelegenheiten für diesen Fehler, der bisher erst einmal aufgetreten ist. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich damit zu $P_{EW} = 9,9 \cdot 10^{-4}$ (Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 1,2 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 7,8 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 2,6 \cdot 10^{-3}$). Für den Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.1.8 Stichprobe S8 „Fehlauslösung der RESA bei Prüfungen eines Schnellabschaltsystems“

Das Schließverhalten der Tankschließventile des Schnellabschaltsystems ist in regelmäßigen Zeitabständen zu überprüfen. Um hierbei eine Fehlauslösung der Schnellabschaltung zu verhindern, muss das jeweils in Reihe geschaltete Schnellöffnungsventil zuvor über eine Spindel in Zu-Stellung blockiert werden. Bei dem hier beschriebenen

Ereignis war die Blockierspindel der zu prüfenden Redundanz bereits eingefahren. Beim Bedienen des Tankschließventils betätigte der Operateur vom Schaltpult in der Warte aus versehentlich das Tankschließventil einer ungesicherten Redundanz. Die Reaktorschnellabschaltung wurde ausgelöst. Das Ereignis ist meldepflichtig.

Die vier Redundanzen sind auf dem Schaltpult nebeneinander angeordnet. Die Unterscheidung der einzelnen Redundanzen wird durch die Gestaltungselemente Beschriftung, Anordnung auf dem Schaltpult und teilweise auch durch Fließbildarstellung unterstützt. Die Recherchen ergaben, dass von einem Fehler bei der Handlungsregulation auszugehen ist, der bei Bedienelementen, die sich im Greifraum befinden und gleich konstruiert sind, zu Fehlbedienungen führen kann.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Bedienen einer Kommandotaste am Leitstand“ und der Fehlerart „Falsche Kommandotaste bedient“. Ergonomische Gestaltungsmerkmale werden eingesetzt. Das Pultsegment weist an dieser Stelle aber eine sehr hohe Belegungsdichte auf. Fehlerfördernd wirkte sich aus, dass sich die Kommandotasten der ungesicherten Redundanzen im Greifraum befinden und gleichartig konstruiert sind. Die Stichprobe umfasst insgesamt 440 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal auftrat. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich damit zu $P_{EW} = 3,4 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 4 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 2,7 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 8,8 \cdot 10^{-3}$). Für diesen Handlungstyp und die dabei aufgetretene Fehlerart wird in THERP ein Erwartungswert von $1,3 \cdot 10^{-3}$ vorgeschlagen (Tabelle 12, Item (3), $P_{5\%} = 3,3 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 3 \cdot 10^{-3}$).

4.2.1.9 Stichprobe S9 „Fehlanregung der Notstromsignale einer Redundanz“

Wie bereits bei der Stichprobe S5, die allerdings aus einer anderen Anlage stammt, war der Lastlauf eines Notstromdieselaggregats durchzuführen. Auch hier ist das laufende Aggregat mit dem Anlagennetz zu verbinden, nachdem die Synchronisationsautomatik die Phasenverschiebung zwischen den Netzen ausgeglichen hat. Die Prüfarbeiten werden durch einen Fachmann vor Ort am Leitstand des zu prüfenden Aggregats durchgeführt. Zur Einleitung der Synchronisation bedient der Operateur die Kommandotaste der Automatik.

Neben diesem Druckschalter befindet sich ein baugleicher Druckschalter, mit dem der Dieselgeneratorschalter geöffnet wird. Der Operateur öffnete bei diesem Ereignis ver-

sehentlich den Dieselgeneratorschalter. Die zugeordnete Notstromschiene wurde spannungslos. Das Ereignis ist meldepflichtig.

Beide Druckschalter sind durch Beschriftung gekennzeichnet. Die Tätigkeit ist hochgeübt. Die Recherchen ergaben, dass von einem Fehler bei der Handlungsregulation auszugehen ist. Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Bedienen eines Druckschalters“ und der Fehlerart „falschen Druckschalter betätigt“. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass beide Schalter im Greifraum der handelnden Person angeordnet sind und gleichartig konstruiert sind. Weitere leistungsbeeinflussende Faktoren sind in dieser Handlungssituation nicht zu berücksichtigen.

Nach dem Ereignis wurde der Druckschalter des Dieselgeneratorschalters in allen Redundanzen mit einer Abdeckung gesichert. Die Stichprobe umfasst insgesamt 1146 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal aufgetreten ist. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ (Fraktilen der Betaverteilung $P_{5\%} = 1,5 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 3,4 \cdot 10^{-3}$). Für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler wird in THERP ein Erwartungswert von $3,7 \cdot 10^{-3}$ vorgeschlagen (Tabelle 12, Item (2), $P_{5\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 3 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 9 \cdot 10^{-3}$).

4.2.1.10 Stichprobe S10 „Fehlanregung der RESA bei Funktionsprüfung der FD-ISO-Ventile“

In der von diesem Ereignis betroffenen Anlage sind die Schließzeiten der Frischdampfisolationsventile (FD-ISO) während des Anfahrens bei Teillastbetrieb zu überprüfen. Dabei werden die Ventile nacheinander vom Steuerpult aus in der Warte geschlossen, so dass jederzeit nur ein Ventil geschlossen und damit eine Frischdampfleitung abgesperrt ist. Sinkt der Frischdampfdurchsatz bei zwei Leitungen unter 85 % des Nenn-durchsatzes ab, so kommt es zur Auslösung der Reaktorschnellabschaltung.

Im hier beschriebenen Fall schloss der Operateur das ISO-Ventil der nächsten Leitung noch ehe das zuvor geprüfte Ventil einer anderen Leitung wieder voll geöffnet war. Damit sanken die Durchsätze in beiden Leitungen unter 85 % ab. Es kam zur RESA Auslösung und damit zur Meldepflicht.

Die Mindestwartezeit zwischen dem Stellbefehl „Auf“ und dem Stellbefehl „Zu“ für das nächste Ventil ist vergleichsweise kurz (2-4 Sekunden). Die kurzen Ventillaufzeiten sind den Operateuren bekannt. In der Handlungssituation ist aufgrund des hohen Auf-

gabendrucks von zumindest moderat erhöhtem Stress auszugehen. Der Operateur hat die Ventile unmittelbar hintereinander betätigt, obwohl die Zeitersparnis gering ist. Der Handlungstyp „Betätigen einer Kommandotaste“ und die dabei aufgetretene Fehlerart „zu früh betätigt“ weist gewisse Parallelen zur Stichprobe 3 auf. Auch dort trat ein Zeitfehler auf, allerdings mit der Fehlerart „zu spät“.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Zeitfehler „zu schnell“ beim Bestätigen von Kommandotasten. Fehlerfördernd wirkten sich der hohe Aufgabendruck und das damit zumindest moderat erhöhte Stressniveau aus. Weitere fehlerfördernde Faktoren sind nicht zu berücksichtigen. Die Stichprobe umfasst insgesamt 81 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal auftrat. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 1,8 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 2,2 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 1,5 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 4,7 \cdot 10^{-2}$). Für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.1.11 Stichprobe S11 „Ausfall einer 400 V-Notstromschiene“

In der hier beschriebenen Handlungssituation war die Kraftstoffpumpe eines Notstromdieselmotors zu prüfen. Nach erfolgreicher Prüfung sollte der prüfungsdurchführende Fachmann die Kraftstoffpumpe von der Wandtafel in der Warte aus wieder abschalten. Anstatt die Kraftstoffpumpe abzuschalten, öffnete der Operateur versehentlich den Verbindungsschalter zwischen der 10 kV-Notstromschiene und der von dieser versorgten 400 V-Notstromschiene. Der daraufhin eingetretene Spannungsausfall an der 400 V-Notstromschiene ist meldepflichtig.

Die Kommandotasten an dieser Wandtafel sind durch Beschriftung gekennzeichnet. Farbliche Kennzeichnung und Fließbilddarstellungen werden eingesetzt, um die ergonomische Gestaltung zu verbessern.

Die Recherchen ergaben, dass von einem Fehler bei der Handlungsregulation auszugehen ist. Die Bedienoberfläche ist ergonomisch günstig gestaltet. Fehlerfördernd wirkte sich aus, dass sich die fälschlicherweise betätigte Taste in der Nähe (im Greifraum) der Kommandotaste für die Kraftstoffpumpe befindet. Weitere leistungsbeeinflussende Faktoren sind für diese Handlungssituation nicht zu berücksichtigen.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Bedienen einer Kommandotaste“ und die Fehlerart „falsche Taste betätigt“. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt,

dass beide Tasten im Greifraum der handelnden Person angeordnet sind und gleichartig konstruiert sind. Die Stichprobe umfasst insgesamt 170 Gelegenheiten für diesen Fehler, der insgesamt einmal aufgetreten ist. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 8,8 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 6,9 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 2,3 \cdot 10^{-2}$). Für den Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler wird in THERP ein Erwartungswert von $1,3 \cdot 10^{-3}$ vorgeschlagen (Tabelle 12, Item (4), $P_{5\%} = 5 \cdot 10^{-5}$, $P_{50\%} = 5 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 5 \cdot 10^{-3}$).

4.2.1.12 Stichprobe S12 „RESA-Auslösung durch versehentliches Betätigen eines Schlüsselschalters“

Der Hauptleitstand der von diesem Ereignis betroffenen Anlage wird einmal pro Woche während der Nachtschicht von einem Operateur gereinigt. Auf diesem Pult befindet sich der Schlüsselschalter „Startfreigabe“. Er ist in Reihe geschaltet zum Schlüsselschalter „Hand-RESA“ und löst im Falle einer Betätigung die Reaktorschnellabschaltung aus. Im Unterschied zum „Hand-RESA“-Schlüsselschalter ist der Schlüsselschalter „Start-Freigabe“ nicht mit einer Abdeckhaube gegen Fehlbedienung geschützt. Bei einer Reinigung des Hauptleitstandes kann es durch einen Stoß, wie in diesem Ereignis geschehen, an den Schlüsselschalter zu einer unbeabsichtigten Betätigung und damit zum meldepflichtigen Ereignis „Auslösung der Schnellabschaltung“ kommen.

Die Stichprobe charakterisiert eine Tätigkeit, die keine Bedienung von Kommandotasten oder Schlüsselschaltern zum Ziel hat. Aufgrund der Art der Tätigkeit ist es jedoch denkbar, dass es bei einem Fehler bei der Handlungsregulation zu einer Fehlbedienung kommen kann. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass hier keine der bekannten Schutzmaßnahmen wie z. B. „Freigabetaste“ oder „Schutzhaube“ realisiert waren. Weitere fehlerfördernde Faktoren sind hier nicht zu berücksichtigen.

Nach dem Ereignis wurde der Schlüssel des Schalters „Startfreigabe“ abgezogen. Die Stichprobe für den Handlungstyp „Reinigen von Pultoberflächen“ und der Fehlerart „versehentliches Bedienen einer Komponente, Bedienvorgang nicht weiter abgesichert“ umfasst insgesamt 1200 Ausführungen. Der Fehler trat einmal auf. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 1,5 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 9,8 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 3,3 \cdot 10^{-3}$).

Die Möglichkeit, dass bei der Ausführung von Tätigkeiten an oder nahe an Schaltpulten Kommandotasten versehentlich bedient werden, wird im THERP-Handbuch, Kapitel 13, diskutiert. Das Spektrum der betrachteten Tätigkeiten schließt solche mit ein, die keine Schalthandlungen erfordern, so dass die Fehlbedienung nicht auf eine Verwechslung von Kommandotasten zurückzuführen ist. Hierzu gehört auch die Reinigung von Schaltpulten. Wahrscheinlichkeiten dafür, dass aus diesen Tätigkeiten Fehlbedienungen resultieren, werden jedoch nicht genannt. Solche Fehler sind mit der Methode THERP nicht bewertbar.

4.2.1.13 Stichprobe S13 „Spannungsausfall an einer 10kV-Notstromschiene“

In der von diesem Ereignis betroffenen Anlage werden die Anregewege der Schutzrichtungen für die Notstromdieselaggregate jährlich geprüft. Nach Abschluss der Prüfung sind die zuvor simulierten Schutzsignale am örtlichen Leitstand des gerade geprüften Aggregates mit Hilfe eines Schlüsselschalters manuell zurückzusetzen. In direkter Nachbarschaft zu diesem Schlüsselschalter befindet sich der Schlüsselschalter „Dieselstartwiederholung“. Der Operateur, ein erfahrener Fachmann, betätigte versehentlich den Schlüsselschalter „Dieselstartwiederholung“. Die dadurch ausgelösten Signale trennen die Notstromschiene von der Eigenbedarfsanlage. Der Diesel konnte wegen den nach wie vor wirksamen Schutzkriterien nicht starten, so dass die Notstromschiene spannungslos wurde. Ein solcher Ereignisablauf ist meldepflichtig.

Die beiden Schlüsselschalter sind nur durch die Beschriftung zu unterscheiden. Sie befinden sich in direkter Nachbarschaft und sind baugleich ausgeführt. Der Handlungstyp „Bedienen eines Schlüsselschalters“ und der beobachtete Fehler „falschen Schlüsselschalter betätigt“ weist gewisse Parallelen zu den in Stichprobe S5 und S9 auf. Dort traten ebenfalls am örtlichen Leitstand im Zuge der Handlungsregulation Auswahlfehler auf, die allerdings Dreh- und Druckschalter betrafen. Wie in S5 und S9 hat sich hier fehlerfördernd ausgewirkt, dass sich beide Schlüsselschalter im Greifraum der handelnden Person befinden und baugleich ausgeführt sind. Weitere leistungsbeeinflussende Faktoren sind in dieser Handlungssituation nicht zu berücksichtigen.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 152 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal auftrat. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 9,8 \cdot 10^{-3}$ (Fraktilen der Betaverteilung $P_{5\%} = 1,2 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 7,8 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 2,5 \cdot 10^{-2}$). Für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler wird in

THERP ein Erwartungswert von $3,7 \cdot 10^{-3}$ vorgeschlagen (Tabelle 12, Item (2), $P_{5\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 3 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 9 \cdot 10^{-3}$).

4.2.1.14 Stichprobe S14 „Druckverlust in einem Druckspeicher“

In der von diesem Ereignis betroffenen Anlage sind die Notkühlvorbereitungssignale des Reaktorschutzsystems regelmäßig zu prüfen. Im Rahmen dieser Prüfungen ist der Druck innerhalb eines Abschnittes der Not- und Nachkühlleitungen abzusenken und danach die genannten Reaktorschutzsignale von der Warte aus zu simulieren. Um zu verhindern, dass hierdurch die Druckspeicherarmaturen geöffnet werden und sich die Druckspeicher in den zuvor druckabgesenkten Leitungsbereich druckentlasten, muss während der Simulation (Dauer ca. 1 Minute) ununterbrochen der Schließbefehl für die Druckspeicherarmaturen erteilt werden. Dies geschieht durch einen Operator, der die entsprechende Kommandotaste in der Warte für die Dauer der Simulation betätigt. Wird diese Betätigung auch nur für kurze Zeit unterbrochen, wie hier geschehen, so wird die Druckspeicherarmatur bereits undicht (kleiner Hubweg aus der geschlossenen Position). Der Druck im Druckspeicher sinkt in unzulässiger Weise ab. Diese Beeinträchtigung der Druckspeicherfunktion ist meldepflichtig.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Betätigen einer Kommandotaste“ und den im Zuge der Handlungsregulation zu unterstellenden Fehlertyp „Taste nicht ausreichend lange betätigt“. Fehlerfördernd wirkte sich aus, dass die Taste verhältnismäßig lange durchgehend zu betätigen ist (keine Selbsthaltung des Stellbefehls). Weitere leistungsbeeinflussende Faktoren sind in dieser Handlungssituation nicht zu berücksichtigen.

Die Stichprobe weist gewisse Parallelen auf zu den Stichproben S3 und S10. Auch dort traten Zeitfehler bei der Bedienung von Kommandotasten, allerdings für die Unterarten „zu spät“ und „zu früh“ betätigt, auf. Sie umfasst insgesamt 1488 Gelegenheiten für den beobachteten Fehler, der einmal auftrat. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ (Fraktilen der Betaverteilung $P_{5\%} = 1,2 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 7,9 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 2,6 \cdot 10^{-3}$). Für diesen Handlungstyp und der dabei aufgetretenen Fehlerart werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.1.15 Stichprobe S15 „RESA nach Fehlfunktion im Kondensatsystem“

Die Referenzanlage dieser Stichprobe befand sich im Anfahrbetrieb. Die Reaktorleistung von ca. 30 % wurde über die Umleitstation abgeführt. In dieser Betriebsphase erfolgt die Zuschaltung der Vorwärmer und Zwischenüberhitzer, wodurch sich die im Kondensator anfallende Wassermenge erheblich reduziert. In diesem Fall müssen die Regelventile der Kondensatablaufregelung durch Handregelung von der Warte aus weiter zugefahren werden, um so die Füllstandsschwankung auszugleichen. Im vorliegenden Fall gelang es dem Operateur nicht, den Füllstandsabfall so auszuregeln, dass das Erreichen des Abschaltgrenzwertes für die Hauptkondensatpumpen vermieden wird. Sind die Hauptkondensatpumpen außer Betrieb, so fehlt auch das für den Umleitbetrieb erforderliche Einspritzwasser. Die Umleitstation schloss und der Frischdampfdruck stieg soweit an, dass die RESA ausgelöst wurde. Das Ereignis ist meldepflichtig.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Regelung einer Prozessgröße mithilfe eines Regelventils“. Aufgetreten ist ein Fehler bei der Handlungsregulation. Die Regelabweichung wurde nicht schnell genug reduziert, (Fehlertyp „Regelabweichung nicht schnell genug reduziert“). Aus ergonomischer Sicht handelt es sich um eine schwierige Regelaufgabe. Die Regelabweichung nimmt schnell zu und es verbleiben nur wenige Sekunden, um das Regelventil weit genug zu schließen. Fehlerfördernd hat sich zusätzlich ausgewirkt, dass die Aufgabenbelastung in dieser Phase hoch ist und zu einer erhöhten Stressbelastung führt. Nach dem Ereignis wurden die automatischen Regelungen so verbessert, dass ein manuelles Regeln nicht mehr erforderlich ist.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 28 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal aufgetreten ist. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 5,2 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 6,3 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 4,2 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 1,3 \cdot 10^{-1}$). Für diesen Handlungstyp und der dabei aufgetretenen Fehlerart werden im THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.2 Ausführungsfehler aufgrund kognitiver Fehler bei der Generierung der Aufgabenstellung

Fehler bei der Ausführung von Handlungen können auch dadurch entstehen, dass der Handlungsausführende ein falsches Handlungsziel vor Augen hat. Ursache für Fehler bei der Generierung der Aufgabenstellung liegen häufig im kognitiven Bereich, z. B. Angaben in schriftlichen Unterlagen werden falsch interpretiert, mündlich mitgeteilte Information wird falsch verstanden oder im Gedächtnis gespeicherte Information wird falsch erinnert. Zu diesen Fehlermechanismen liegen die nachfolgend vorgestellten Stichproben vor.

4.2.2.1 Stichprobe S16“ Funktionsbeeinträchtigung eines Notstromdieselmotors“

Die regelmäßig durchzuführenden Wartungsarbeiten an den Notstromdieselmotoren sind mit einer Funktionsprüfung abzuschließen. Im Rahmen einer solchen Prüfung wurden eine ungewöhnliche Abgasrußentwicklung und ein erhöhter Ladedruck bemerkt. Eine Überprüfung des Dieselmotors beim Hersteller ergab, dass die Einspritzdüsenhalter um 180° verdreht montiert waren. Eine solche Funktionsbeeinträchtigung ist meldepflichtig.

Bei den Wartungsarbeiten werden auch die Einspritzdüsenhalter ausgebaut. Beim späteren Wiedereinbau der insgesamt 16 Einspritzdüsenhalter ist auf die korrekte Einbaulage zu achten. Ein Fehleinbau ist konstruktiv nicht ausgeschlossen. Die Montageanleitung enthält keinen Hinweis auf diese Problematik. Der Monteur, ein erfahrener Fachmann, merkt sich beim Demontagevorgang die korrekte Lage und führt die Remontage entsprechend den erinnerten Informationen durch. Im vorliegenden Fall waren alle 16 Halter verkehrt eingebaut worden.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Remontage eines Bauteils“ und die Fehlerart „Aufgabenstellung falsch erinnert, Bauteil in falscher Position eingebaut“. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass die Aufgabenstellung nicht nachgelesen werden konnte und auch sonst keine wirksamen Fehlererkennungsmöglichkeiten gegeben waren. Eine falsch erinnerte Vorstellung über einen technischen Sachverhalt kann sich, wie dieser Fall zeigt, auf eine große Zahl gleichartiger Handlungen negativ auswirken. Die Stichprobe umfasst insgesamt 36 Gelegenheiten für diesen Fehler, der

bisher einmal auftrat. Damit ergibt sich der Erwartungswert für die Fehlerwahrscheinliche zu $P_{EW} = 4 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung $P_{5\%} = 4,9 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 3,3 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 1 \cdot 10^{-1}$). Für diesen Handlungstyp und der dabei aufgetretenen Fehlerart werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.2.2 Stichprobe S17 „Fehlöffnen des Druckhalterabblaseventils“

Bei einer wiederkehrenden Prüfung einer Teilfunktion der Kühlmittelmassen- und Druckbegrenzung sind in der von dem Ereignis betroffenen Anlage insgesamt 3 Leitungen für den Datentransfer und 4 Leitungen für den Prüfvorgang an den Leittechnikschrank vor Ort anzuschließen. Der Anschluss jeder Leitung erfolgt über einen 48-poligen Stecker. Alle 7 Stecker sind baugleich. Die Prüfung wird bei Leistungsbetrieb durchgeführt.

Die Arbeiten vor Ort beginnen damit, dass die 3 Datenbusstecker angeschlossen werden und danach die Spannungsversorgung des Prüfwagens eingeschaltet wird. Beim hier beschriebenen Ereignis steckte der Operateur, ein erfahrener Fachmann, die 3 Datenbusstecker versehentlich in die Prüfsignalanschlussbuchsen des Leittechnikschrankes. Beim Zuschalten der Spannungsversorgung wurde dadurch über die Prüfsignalanschlüsse ein Fehlsignal in den Leittechnikschrank eingespeist, das ein Öffnen des Druckhalterabblaseventils bewirkte. Eine solche Fehlerfolge ist meldepflichtig.

Die nachträglichen Recherchen ergaben, dass der Operateur der Auffassung war, die korrekten Anschlüsse für die 3 Datenbusstecker ausgewählt zu haben. Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Anschluss von Kabeln an Leittechnikschrankbuchsen“ und die Fehlerart „Aufgabenstellung falsch erinnert, Anschluss an falsche Buchse“. Die Prüfleitungsbuchsen sind durch Beschriftung und durch die Lage von den Datenbusbuchsen unterscheidbar. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass alle Stecker und Buchsen baugleich ausgeführt waren. Eine falsch erinnerte Vorstellung über einen technischen Sachverhalt, hier die Lage der Anschlussbuchsen, wirkte sich hier auf alle gleichartigen Handlungen aus.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 33 Gelegenheiten für einen solchen Fehler, der bisher einmal aufgetreten ist. Damit ergibt sich der Erwartungswert für die Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 4,4 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 5,4 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 3,5 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 1,1 \cdot 10^{-1}$). Für diesen Handlungstyp und der dabei aufgetretenen Fehlerart werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.2.3 Stichprobe S18 „Auslösung der RESA beim Simulieren von Reaktorschutzgrenzwerten“

Um die Abschaltbefehle der Reaktorgebäude-Sumpfpumpen zu prüfen, müssen innerhalb des Reaktorschutzsystems Reaktorschutzgrenzwerte einkanalig angeregt werden. Zur Überwachung der Prozessgröße sind insgesamt 3 Anregekanäle vorhanden. Die Anregung eines Kanals bewirkt die Abschaltung einer Sumpfpumpe. Um beide Pumpen zu testen, müssen 2 Anregekanäle nacheinander simuliert werden. Hierzu muss der Fachmann vor Ort an der Baugruppe die Simulation ausführen und danach die Rücksetzung des Signalspeichers, die von der Warte aus erfolgt, veranlassen. Erst nach der Speicherrücksetzung kann vor Ort der zweite Grenzwert simuliert werden. Stehen zwei Grenzwertsignale gleichzeitig an, wie in diesem Ereignis geschehen, so löst das Reaktorschutzsystem die Schnellabschaltung des Reaktors aus.

Zur Durchführung der Arbeiten werden eine Frei- und Rückschaltliste und eine Prüfanweisung verwendet. Der Prüfungsdurchführende soll dem Handelnden vor Ort die Prüfanweisung mitgeben. Im beschriebenen Fall gab er ihm jedoch die Frei- und Rückschaltliste, die im Unterschied zur Prüfanweisung keine Angaben zur Speicherrücksetzung nach einmaliger Simulation enthält. Demzufolge unterblieb die Speicherrücksetzung vor der Simulation des zweiten Kanals.

Die Zusammenstellung der Arbeitsunterlagen für die Tätigkeit vor Ort erfolgte auf Basis der Erfahrung des Prüfungsdurchführenden aus früheren Prüfungen. Die korrekte Unterlagenzusammenstellung muss erinnert werden. Die Stichprobe charakterisiert den Handlungstyp „Zusammenstellung von Arbeitsunterlagen“ und die Fehlerart „Aufgabenstellung falsch erinnert, Unterlagen fehlerhaft zusammengestellt“. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass die Arbeiten vor Ort auch weitgehend mit der Frei- und Rückschaltliste ausgeführt werden können. Weitere relevante fehlerfördernde Einflüsse konnten nicht aufgestellt werden. Der Handlungsfehler vor Ort war eine unmittelbare Folge des Fehlers bei der Arbeitsvorbereitung.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 84 Gelegenheiten für einen solchen Fehler, der bisher einmal auftrat. Damit ergibt sich der Erwartungswert für die Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 1,7 \cdot 10^{-2}$ (Fraktilen der Betaverteilung: $P_{5\%} = 2,1 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 1,4 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 4,6 \cdot 10^{-2}$). Für diesen Handlungstyp und der dabei aufgetretenen Fehlerart werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.2.4 Stichprobe S19 „Nichtöffnen eines Sicherheitsventils“

In der von diesem Ereignis betroffenen Anlage werden die Funktion und der Ansprechdruck von Rohrleitungssicherheitsventilen regelmäßig mit einem Prüfzyklus von 4 Jahren geprüft. Hierzu wird ein zu prüfendes Ventil aus der Rohrleitung ausgebaut und auf dem Prüfstand mit Druck beaufschlagt. Bei einer solchen Prüfung sprach eine Armatur beim Sollwert von 53 bar nicht an und öffnete auch bei einem Prüfdruck von 75 bar nicht. Ein solches Fehlverhalten ist meldepflichtig.

Die anschließende Untersuchung des Ventils ergab, dass die Spannschraube zu weit eingeschraubt war und das Ventil infolge einer zu hohen Federspannung blockierte. Der korrekte Sitz der Spannschraube wird über eine Abstandsmarke, deren Lage am Prüfstand kontrolliert wird, eingestellt (vgl. hierzu auch Stichprobe S2, die aus einer anderen Anlage stammt). Die Abstandsmarke wurde bei der vorangegangenen Prüfung korrekt ermittelt und dokumentiert. Die Recherchen ergaben, dass von einem Verwechslungsfehler bei der Endmontage auszugehen ist. Der Monteur verwechselte bei der Remontage die Kontermutter, mit der die korrekt eingestellte Spannschraube zu sichern ist, mit der Spannschraube und drehte diese komplett ein. Prüfung und Einstellung des Ansprechdruckes sind ein Arbeitsschritt. Bislang war keine zusätzliche Prüfung nach Abschluss aller Montagearbeiten vorgesehen.

Die Stichprobe ist charakteristisch für Montagearbeiten bei denen die Handlungsobjekte verwechselt werden können. Im konkreten Fall verwechselte der Monteur die Kontermutter mit der Spannschraube. Bei der Auswahl der Handlungsobjekte geht er gedächtnisgestützt vor (Fachkunde, vgl. hierzu auch Stichprobe S15). Es liegt der Handlungstyp „Remontage eines Bauteils“ und die Fehlerart „Aufgabenstellung falsch erinnert, falsches Bauteil betätigt“ vor. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass beide Muttern auf der gleichen Gewindestange sitzen und vergleichbar zu bedienen sind.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 888 Gelegenheiten für einen solchen Fehler, der einmal aufgetreten ist. Damit ergibt sich der Erwartungswert für die Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 1,7 \cdot 10^{-3}$ (Fraktilen der Betaverteilung: $P_{5\%} = 2 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 1,3 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 4,4 \cdot 10^{-3}$). Für diesen Handlungstyp und der dabei aufgetretenen Fehlerart werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.2.5 Stichprobe S20 „Fehlkalibrierung der Reaktorleistung beim Anfahren der Anlage“

Während des Hochfahrens des Reaktors auf Vollast wird in der Anlage in der das hier beschriebene Ereignis auftrat, die innerhalb der Reaktorleistungsbegrenzung (RELEB) berechnete Reaktorleistung kalibriert. Hierzu wird zunächst die aktuelle Reaktorleistung durch ein zur RELEB diversitäres Verfahren ermittelt. In der Folge wird vor Ort an den Leittechnikschranken der RELEB überprüft, ob die dort gemessenen Werte mit dieser Vorgabe übereinstimmen. Gegebenenfalls sind die durch die RELEB ermittelten Werte zu korrigieren.

Die RELEB ist vierkanalig aufgebaut. Die Kalibrierungsaufgabe ist somit an vier Leittechnikschranken durchzuführen. An jedem der vier Schränke befinden sich eine Buchse zur Messung der innerhalb der RELEB ermittelten Reaktorleistung und ein Drehpotentiometer zur Anpassung des gemessenen Wertes an die aktuelle Vorgabe. Aufgrund des internen leittechnischen Aufbaus der RELEB führen vorgenommene Anpassungen nur verzögert zu Reaktionen in der weiteren Signalverarbeitung. Die Kalibrierungsaufgabe wird von zwei fachkundigen Personen durchgeführt.

Drehpotentiometer und Messbuchse sind unterschiedlich beschriftet. In geringem räumlichem Abstand zu der für die Kalibrierung zu verwendenden Buchse befindet sich allerdings noch eine weitere Buchse. An ihr können 50 % der durch die RELEB ermittelten Reaktorleistung abgelesen werden. Für diese nicht zu verwendende Buchse und das Drehpotentiometer sind identische schriftliche Bezeichnungen vorhanden.

Wird versehentlich in diese Buchse eingesteckt und entsprechend dem dort gemessenen Wert kalibriert, so ist das innerhalb dieses Kanals der RELEB verwendete Messsignal für die Reaktorleistung um einen Faktor 2 zu hoch eingestellt. Eine einkanalige Fehlereinstellung ist noch ohne Folgen für den weiteren Anlagenbetrieb. Die anderen drei intakten Kanäle majorisieren die erzeugten Fehlsignale (2 von 4 Bewertungen, d. h. erst wenn zwei der vier RELEB-Kanäle eine Zustandsänderung erfassen, werden Maßnahmen ausgelöst). Die Abweisung eines Kanals wird gemeldet. Wird dieser Ausführungsfehler in einer weiteren Redundanz wiederholt, noch ehe die Fehlermelderichtungen der RELEB ansprechen und Gegenmaßnahmen getroffen werden können (um einige Minuten verzögerte Reaktion der RELEB bei erheblichen Signalanpassungen), so kommt es zur Auslösung der Reaktorschnellabschaltung durch die RELEB.

Die Arbeiten vor Ort wurden ohne schriftliche Unterlagen durchgeführt. Die Aufgabenstellung, zu der auch die korrekte Wahl der Messbuchse gehört, muss erinnert werden. Im hier beschriebenen Fall wurde die falsche Messbuchse gewählt und falsch justiert. Die Kalibrierungsvorgänge in den einzelnen Redundanzen erfolgten unmittelbar hintereinander, so dass nur eine kurze Zeit später auch die nächste Redundanz falsch justiert war. Vor Ort gibt es keine Möglichkeit, einen Kalibrierungsfehler zu entdecken. Auch die nach dem Ansprechen von Alarmen durch das Wartepersonal eingeleiteten Gegenmaßnahmen kamen zu spät. Das Sicherheitssystem löste die Reaktorschnellabschaltung aus. Das Ereignis ist meldepflichtig.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Anschluss von Kabeln an Leittechnik-Schrankbuchsen“ und die Fehlerart „Aufgabenstellung falsch erinnert, Anschluss an falsche Buchse“ (vgl. hierzu auch Stichprobe S17). Besonders fehlerfördernd wirkte sich aus, dass das Justierungspotentiometer und die fehlerhaft verwendete Buchse gleich beschriftet waren. Eine falsch erinnerte Vorstellung (gleich Beschriftetes gehört zusammen) über einen technischen Zusammenhang wirkt sich auf alle gleichartigen Handlungen und auch auf weitere beteiligte Personen aus.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 18 Gelegenheiten für einen solchen Fehler, der einmal aufgetreten ist. Damit ergibt sich der Erwartungswert für die Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 7,9 \cdot 10^{-2}$ (Fraktilen der Betaverteilung: $P_{5\%} = 9,9 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 6,5 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 2 \cdot 10^{-1}$). Für den Handlungstyp und die dabei aufgetretene Fehlerart werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.2.6 Stichprobe S21 „Ansprechen der Reaktorschutzsignale zum Teilabfahren der Anlage“

Die Anlage, in der das hier beschriebene Ereignis eintrat, befand sich im Abfahrbetrieb und hatte bereits den Betriebszustand „unterkritisch, heiß“ erreicht. Aufgrund der hohen Aufgabenbelastung handeln die Operateure teilweise eigenständig, d.h. entsprechend Abfahr-Betriebshandbuch erforderliche Schalthandlung werden nach Vorgabe der generellen Ziele durch den Schichtleiter eigenverantwortlich durchgeführt (ohne Genehmigung des Schichtleiters im Detail).

In dieser Abfahrphase stellte der zuständige Operateur entsprechend den Vorgaben des BHBs auf eine anlagenschonende Fahrweise um. Er nahm die laufenden Haupt-

kühlmittelpumpen bis auf eine außer Betrieb und sperrte die den abgeschalteten Pumpen zugeordneten Dampferzeuger zur Hauptwärmesenke hin ab. Kurz nach Abschluss dieser Maßnahme veranlasste der Schichtleiter eine wiederkehrende Prüfung, bei der die einzige noch laufende Hauptkühlmittelpumpe bestimmungsgemäß abgeschaltet wird. Nach der Abschaltung dieser Pumpe stieg der Druck in den bereits isolierten Dampferzeuger soweit an, dass die Teilabfahrtsignale des Reaktorschutzsystems ausgelöst wurden. Hierdurch tritt die Meldepflicht des Ereignisses ein.

Die Voraussetzungen zur Durchführung der Prüfung lagen zu diesem Zeitpunkt nicht vor. Vor der Veranlassung der Prüfung hätte sich der Schichtleiter bei seinem für die Sekundärseite zuständigen Operateur über den Betriebszustand erkundigen müssen. Dieser Kommunikationsvorgang unterblieb in diesem Fall. Aufgrund dieses Kommunikationsfehlers hatte der Schichtleiter eine falsche Vorstellung von den prüfungsrelevanten Randbedingungen und generierte eine fehlerhafte Aufgabenstellung für die Prüfungsdurchführenden.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Erteilen einer Anweisung“ und der Fehlertyp „Falsche Anweisung erteilt unter der Bedingung, dass eine notwendige vorausgehende Kommunikation unterblieb“ sowie für den Handlungstyp „Kommunikation einer Information“ und den Fehlertyp „Kommunikation wird unterlassen“. Somit liegt bzgl. der Erteilung einer Anweisung ein Ausführungsfehler und bzgl. der Durchführung des Kommunikationsvorgangs ein Unterlassungsfehler vor. Fehlerfördernd wirkte sich aus, dass die Aufgabenbelastung der beteiligten Personen hoch war und von einem erhöhten Stress auszugehen ist.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 17 Gelegenheiten für diesen Fehler, die einmal aufgetreten sind. Damit ergibt sich der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit zu $P_{EW} = 8,3 \cdot 10^{-2}$ (Fraktilen der Betaverteilung: $P_{5\%} = 1 \cdot 10^{-2}$, $P_{50\%} = 6,8 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 2,1 \cdot 10^{-1}$). Für diese Handlungstypen und die dabei aufgetretenen Fehler werden in THERP keine Daten vorgeschlagen.

4.2.2.7 Stichprobe S22 „Spannungsausfall in einer Redundanz des Notstromsystems“

In der von diesem Ereignis betroffenen Anlage werden die automatischen Einrichtungen zur Umschaltung der 10 kV-Notstromschaltanlagen auf das Reservenetz jährlich

bei der Anlagenrevision geprüft. Um den Spannungsausfall in der Eigenbedarfsanlage zu simulieren, sind die Sicherungsautomaten der drei Messungen zur Überwachung der Spannung der zugehörigen Eigenbedarfsschiene vor Ort abzuschalten. Die Prüfung wird von einem Fachmann eigenverantwortlich durchgeführt. Er schaltete versehentlich die Sicherungsautomaten zur Messung der Frequenz an der zu prüfenden Notstromschiene ab und löste damit ebenfalls die Reservenetzumschaltung aus. Da aber die Frequenzmesssignale der geprüften Notstromschiene nicht zur Verfügung standen, detektierten die Automaten fälschlicherweise einen Funktionsausfall der Reservenetzumschaltung. In einem solchen Fall startet der zugeordnete Notstromdiesel. Doch auch nach Zuschaltung des Diesels waren die Frequenzmessungen nicht verfügbar. Die Automatik interpretiert dies als einen Dieselfehlstart und öffnet den Generatorschalter des Aggregats. Die Notstromschiene bleibt spannungslos. Das Ereignis ist meldepflichtig. Nur wenige Tage später führte eine andere Person diesen Fehler bei der Prüfung in einer anderen Redundanz aus.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Abschalten von Sicherungsautomaten“ und die Fehlerart „Ausführungsfehler, Handlungsobjekt fehlerhaft ausgewählt“. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass die Sicherungsautomaten dieser verschiedenen Messeinrichtungen vor Ort die gleiche Kurzbezeichnung haben und die fehlerhaft betätigten Sicherungsautomaten sich in dem Schaltschrank befinden, in dem die direkt vorangehende Handlung auszuführen war. Die Prüfanweisung ist ergonomisch ungünstig gestaltet. Der korrekte Handlungsort kann leicht überlesen werden. Da der Prüfablauf noch nicht lange eingeführt war, konnte sich hier auch noch keine spezifische Erfahrung aufbauen. Die Defizite wurden durch Erfahrungen aus anderen Handlungssituationen kompensiert. Beide Personen entschieden sich für das falsche Handlungsobjekt (Aufgabenstellung fehlerhaft generiert).

Die Stichprobe umfasst insgesamt 4 Gelegenheiten für diesen Fehler der insgesamt zweimal auftrat. Es liegen mehrere fehlerfördernde Faktoren vor. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich zu $P_{EW} = 5 \cdot 10^{-1}$ (Fraktilen der Betaverteilung: $P_{5\%} = 1,7 \cdot 10^{-1}$, $P_{50\%} = 5 \cdot 10^{-1}$, $P_{95\%} = 8,3 \cdot 10^{-1}$). Für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler wird in THERP kein passender Wert vorgeschlagen.

4.2.2.8 Stichprobe S23 „Spannungsausfall an einer Schiene des gesicherten Notstromnetzes“

Im Rahmen einer wiederkehrenden Prüfung sind die Zustandsmeldelampen der Schaltgeräte des gesicherten 380V-Notstromnetzes zu kontrollieren. Die Kontrolle wird vor Ort an den Schaltschränken durchgeführt. Bei dem dieser Stichprobe zugrundeliegenden Ereignis öffnete der Prüfungsdurchführende irrtümlich einen Verbindungsschalter zum ungesicherten Notstromnetz. Die Spannung der hierüber versorgten gesicherten 380V-Schiene fiel aus. Auslegungsgemäß startete das zugeordnete Diesellaggregat und übernahm die Versorgung dieser Schiene. Die Anforderung einer Komponente des Sicherheitssystems ist meldepflichtig.

Die Handlung ist charakteristisch für den Handlungstyp „Kontrolle von Zustandsmeldungen“ und dem Fehlertyp „Fehlbedienung einer Kommandotaste, Aufgabenstellung falsch erinnert“. Der Prüfungsdurchführende hätte nur kontrollieren sollen, ob der Schaltzustand des Schalters ordnungsgemäß signalisiert wird. Im Nachbarblock werden vergleichbare Prüfungen durchgeführt. Dort ist allerdings eine Lampenprüftaste auf der Frontplatte des Schalters zu betätigen. Eine solche Prüftaste gibt es hier nicht. Die handelnde Person erinnerte sich an die Aufgabendurchführung im anderen Block und betätigte die Kommandotaste „Schalter auf“ in der Annahme eine Lampenprüftaste zu betätigen. Fehlerfördernd hat sich noch ausgewirkt, dass in der Prüfanweisung nicht explizit auf die Unterschiede zwischen beiden Blöcken hingewiesen wurde. Es ist üblich, dass die Prüfungsdurchführenden in beiden Blöcken tätig sind. Nach dem Ereignis wurde die Prüfungsanweisung durch einen entsprechenden Hinweis ergänzt.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 56 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal auftrat. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich zu $P_{EW} = 2,6 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 3,2 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 2,1 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 6,8 \cdot 10^{-2}$). Für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler wird in THERP kein geeigneter Wert vorgeschlagen.

4.2.2.9 Stichproben S24 bis S26 „Ausfall einer Notspisewasserpumpe“

Die folgenden drei Stichproben sind dadurch gekennzeichnet, dass der Stichprobenumfang sehr gering ist. Jede der Handlungssituationen weist eine Reihe von sehr fehlerfördernden Einflussfaktoren auf, so dass es trotz des geringen Stichprobenumfangs

schon zu Fehlern kam. In den Datentabellen der Methode THERP fehlen oft Angaben zum Einfluss von besonders fehlerfördernden Faktoren, so dass diese Stichproben Hinweise auf die Auswirkungen solcher Faktoren geben. Die quantitativen Bewertungen können wegen des geringen Umfangs der Stichproben noch nicht abschließend sein. Ziel ist es, die Anzahl vergleichbarer Stichproben weiter zu erhöhen, um durch die Anwendung der zweiten Stufe die Methode von Bayes den Stichprobenumfang und damit die Bewertungsbasis zu verbreitern.

Die Stichproben S24, S25 und S26 stammen aus dem gleichen meldepflichtigen Ereignis und sind charakteristisch für den Handlungstyp „Interpretation visuell dargebotener Information“. Die Informationen wurden falsch interpretiert. In der vom Ereignis betroffenen Anlage lag ein latenter Fehler bei der Ölversorgung einer Notspeisewasserpumpe vor. Im Rahmen der Prüfungen von Reaktorschutzsignalen wurde die Pumpe wiederholt zu verschiedenen Zeitpunkten und durch verschiedene Personen getestet. Die Aggregatesicherheits-einrichtung sprach in jedem Fall an. Sie schaltet die Pumpe ab, wenn sich innerhalb einer kurzen Zeitspanne nach dem Pumpenstart nicht ein ausreichend hoher Öldruck aufbaut. Nach einer Schutzabschaltung über dieses Kriterium wird eine KMA-Meldung ausgelöst und eine Störmeldelampe im Bedienfeld dieser Pumpe weist auf die Störung hin. Das Schutzkriterium ist mit der Zustandsmeldung „Pumpe ein“ logisch UND verknüpft, d.h. nach Abschaltung der Pumpe ist das Aggregateschutzsignal nicht mehr wirksam. Folgende Fehler traten auf:

- S24, der Operateur am Leitstand interpretiert die KMA-Meldung falsch. Eine Reihe unterschiedlicher Faktoren haben sich fehlerfördernd ausgewirkt. Die KMA-Meldung ist eine Sammelmeldung, die auch durch andere Störungsursachen ausgelöst werden kann. Die Meldung ist gehend quittierbar, wenn die Pumpe abgeschaltet ist. Solche Meldungen können auch prüfbedingt und nicht nur schadensbedingt ausgelöst werden. Der Operateur, der die Meldung quittierte, war in die Prüfung nicht direkt eingebunden und wusste nicht, dass es keinen prüfbedingten Anlass für die Meldung gab.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 4 Gelegenheiten für diesen Fehler, der viermal auftrat. Auf der Grundlage dieser Stichprobenparameter ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit, dass eine KMA-Meldung bei sehr ungünstigen Randbedingungen fehlerhaft beantwortet wird, der Erwartungswert von $P_{EW} = 0,9$ (Fraktile der Beta-Verteilung $P_{5\%} = 6,4 \cdot 10^{-1}$, $P_{50\%} = 9,5 \cdot 10^{-1}$, $P_{95\%} = 1$). Für diesen Fehler und

unter den beschriebenen Randbedingungen wird in THERP keine Fehlerwahrscheinlichkeit vorgeschlagen.

- S25, Störmeldelampe wird falsch interpretiert.
Im Zuge der Prüfung der Reaktorschutzsignale (vgl. S24) wird die Notspeisewasserpumpe gestartet und muss am Ende der Prüfung manuell abgeschaltet werden. Dieser Vorgang wird als „Normalisierung“ bezeichnet. Das Prüfteam arbeitete an der Reaktorschutztafel und wies den Leitstandoperator am Ende der Prüfung an, die Notspeisewasserpumpe zu „normalisieren“. Dieser sah die aufgrund der Schutzabschaltung der Pumpe leuchtende Störmeldelampe und quittierte sie fälschlicherweise ohne dem Meldegrund weiter nachzugehen. Die Meldung wurde falsch interpretiert. Besonders fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass die Meldung gehend quittiert werden konnte und das Ansprechen der Meldelampe bei Prüfungen im Reaktorschutzsystem vorkommen kann.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 4 Gelegenheiten für diesen Fehler, der viermal auftrat. Ausgehend von diesen Stichprobenparametern ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit, dass unter ungünstigen Randbedingungen eine Störmeldelampe fehlerhaft beantwortet wird ein Erwartungswert von $P_{EW} = 0,9$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 6,4 \cdot 10^{-1}$, $P_{50\%} = 9,5 \cdot 10^{-1}$, $P_{95\%} = 1$). In der Methode THERP wird hierzu keine Fehlerwahrscheinlichkeit vorgeschlagen.

- S26, Signalisierung einer Zustandsmeldelampe falsch interpretiert.
Bei der Prüfung eines der vorgenannten Reaktorschutzsignale wird die Funktion eines Absperrschiebers in der Notspeisewasserleitung geprüft. Die Prüfungsdurchführenden befinden sich an der Reaktorschutztafel, regen das Reaktorschutzsignal an und beobachten die Zustandsmeldelampe des Absperrschiebers. Das Reaktorschutzsignal startete zusätzlich die Notspeisepumpe, die durch den Eingriff des Aggregateschutzes sofort wieder abgeschaltet wurde. Da das Reaktorschutzsignal hier während der gesamten Laufzeit der Absperrarmatur (ca. 2 Minuten) simuliert wird und der Aggregateschutz bei stehender Pumpe nicht wirksam ist, wurde die Pumpe unmittelbar nach der Schutzabschaltung wieder gestartet. Die zahlreichen Schaltspiele der Pumpe, die aus diesem technischen Zusammenhang folgten, verursachten ein Blinken der Zustandsmeldelampe der Pumpe an der Reaktorschutztafel. Die Zustandsmeldelampe der Pumpe befindet sich im Sichtbereich der Zustandsmeldelampe des Absperrschiebers. Das Verhalten der Meldelampe der Pumpe wurde von den Prüfungsdurchführenden falsch interpretiert und demzufolge auch nicht weiter hinterfragt. Fehlerfördernd hat

sich ausgewirkt, dass das Verhalten der Notspeisewasserpumpe in dieser Situation nicht Bestandteil der Prüfung und damit auch kein Prüfziel ist.

Die Stichprobe umfasst eine Gelegenheit für diesen Fehler, der unter den beschriebenen Randbedingungen einmal aufgetreten ist. Daraus ergibt sich ein Erwartungswert von $P_{EW} = 0,75$ (Fraktilen der Beta-Verteilung: $P_{5\%} = 2,3 \cdot 10^{-1}$, $P_{50\%} = 8,4 \cdot 10^{-1}$, $P_{95\%} = 9,9 \cdot 10^{-1}$). Zu dieser Handlungssituation passende Fehlerwahrscheinlichkeiten werden in THERP nicht vorgeschlagen.

4.2.3 Auslassungsfehler

Vor der Ausführung einer regelbasierten Handlung ist es erforderlich, sich der dieser Handlung zugrundeliegenden Aufgabenstellung bewusst zu werden. Solche Aufgabenstellungen können im Gedächtnis gespeichert sein und müssen in der konkreten Handlungssituation erinnert werden oder werden von außen an den Handelnden herangetragen (Inhalt einer schriftlichen Unterlage, Kommunikation). Gedächtnisfehler (sowohl Kurzzeit- als auch Langzeitgedächtnis), Kommunikationsfehler (nicht oder falsch verstanden) und Fehler beim Lesen und Verstehen schriftlicher Unterlagen sind wichtige Gründe für das Auslassen eines Handlungsschrittes oder einer ganzen Aufgabe. Zu Auslassungsfehlern und den dargestellten Ursachen liegen folgende Stichproben vor.

4.2.3.1 Stichprobe S27 „Auslösung der Reaktorschutzabschaltung beim Anfahren der Anlage“

Der Reaktor sollte nach Abschluss der Revision auf Vollast gefahren werden und befand sich bereits im Teillastbetrieb. In dieser Phase muss der zuständige Operateur darauf achten, dass der Förderdruck der Speisewasserpumpen mindestens um 10 bar über dem Reaktordruck liegt. Dadurch wird eine ausreichende Speisewasserversorgung sichergestellt und der Reaktorfüllstand kann nicht abnehmen. Die Förderhöhe der Speisewasserpumpen ist in dieser Betriebsphase manuell zu regeln. Es handelt sich um eine diskontinuierliche Regelaufgabe, d.h. von Zeit zu Zeit sind die Prozessgrößen Speisewasserdruck und Reaktordruck zu kontrollieren und bei Bedarf ist der Speisewasserdruck zu erhöhen. Im hier beschriebenen Fall wurde diese Aufgabe nicht ausgeführt. Die Druckdifferenz und damit die Einspeisemenge und der Reaktorfüllstand fielen soweit ab, dass das Reaktorschutzsystem den Reaktor abschaltete.

Die Stichprobe ist charakteristisch für Auslassungsfehler, hier Auslassen einer Aufgabe, bei gedächtnisgestütztem Handeln. Das Vorgehen ist im Betriebshandbuch beschrieben und wird auch gelesen. Der Operateur muss sich allerdings in der konkreten Situation daran erinnern. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass in dieser Phase die Aufgabenbelastung besonders hoch ist und von zumindest moderat erhöhtem Stressniveau auszugehen ist.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 50 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal auftrat. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 2,9 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 3,5 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 2,4 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 7,6 \cdot 10^{-2}$). Für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler wird in THERP ein Erwartungswert (Basiswert) von $1,6 \cdot 10^{-2}$ vorgeschlagen (Tabelle 7, Item (5#), $P_{5\%} = 2 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 1 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 5 \cdot 10^{-2}$). Entsprechend den Vorgaben der Methode muss dieser Wert noch modifiziert werden (Wirkung des Einflussfaktors „moderat erhöhtes Stressniveau“). Mit Tabelle 16, Item (4a) folgt ein Modifikationsfaktor 2 und damit eine mit THERP ermittelte Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit von $P_{EW} = 3,2 \cdot 10^{-2}$.

4.2.3.2 Stichprobe S28 „Handlungsfehler beim Transport unbestrahlter Brennelemente“

In der von diesem Ereignis betroffenen Anlage waren 8 unbestrahlte Brennelemente vom Trockenlager in das Brennelementlagerbecken zu transportieren. Die neuen Brennelemente werden dazu zunächst mit dem Hilfshub der Lademaschine aus dem Trockenlager in den Korb der Übergabestation gestellt. Der Korb wird abgesenkt und danach wird das Brennelement mit dem Haupthub zum Abstellplatz im Lagerbecken transportiert. Hilfshub und Haupthub sind von zwei separaten Steuerpulten auf der Brennelementlademaschine aus zu bedienen. Die Arbeiten werden von einem qualifizierten Fachmann ausgeführt. Insgesamt 6 Umsetzungsvorgänge wurden fehlerfrei durchgeführt. Allerdings bestand schon ein erheblicher Zeitdruck, da es zu Verzögerungen bei vorlaufenden Arbeiten gekommen war und diese Aufgabe erst sehr spät begonnen werden konnte. Beim Transport des 7. Brennelements vergaß der Operateur nach dem Absetzen in die Brennelement-Lagerbeckenposition den Greifer des Haupthubes wieder zu öffnen, zog das Brennelement dadurch wieder in den Teleskopmast ein und setzte es beim Versuch das nächste Brennelement zu greifen auf dieses auf. Die au-

tomatischen Schutzeinrichtungen der Lademaschine sprachen an und brachen den Transportvorgang ab. Das Ereignis ist meldepflichtig.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Ausgabe eines Stellbefehls vom Leitstand aus“ und dem Fehlertyp „Vergessen eines Handlungsschrittes bei gedächtnisgestützten Handeln“. Das Öffnen des Greifers am Ende eines Transportvorganges ist eine hochgeübte Handlung. In der hier beschriebenen Arbeitssituation lagen mehrere sehr fehlerfördernde Faktoren vor.

- Die Arbeiten mussten unter erheblichem Zeitdruck ausgeführt werden.
- Die Steuerungseinrichtungen der Lademaschine wurden gerade umgebaut. Sie musste ohne die sonst benutzten Visualisierungshilfen (Monitor) gefahren werden.
- Die Arbeiten mussten immer wieder kurz unterbrochen werden, um Störungsmeldungen der noch nicht wieder einsetzbaren Teile der Automatik zu quittieren.
- Zu benutzende Bedien- und Beobachtungseinrichtungen waren ungünstig gestaltet und ungünstig angeordnet (Anordnung und Größe der Lastanzeige, getrennte Anordnung der Greiferbedienelemente und der Greiferzustandsmeldelampen, Zustandsmeldelampe „Auf“ und „Zu“ mit gleichem Farbcode).

Aufgrund dieser belastenden Faktoren ist davon auszugehen, dass die Arbeiten unter hohem Stress auszuführen waren.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 7 Arbeitsvorgänge, bei denen unter diesen ungünstigen Bedingungen zu handeln war. Der Fehler trat einmal auf. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 1,9 \cdot 10^{-1}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 2,6 \cdot 10^{-2}$, $P_{50\%} = 1,6 \cdot 10^{-1}$, $P_{95\%} = 4,4 \cdot 10^{-1}$). Für diesen Handlungstyp und dem dabei aufgetretenen Fehler wird in THERP ein Basiswert von $P_{EW} = 1,6 \cdot 10^{-2}$ vorgeschlagen (Tabelle 7, Item (5#)). Entsprechend den Vorgaben der Methode muss dieser Wert aufgrund der Wirkung des Faktors „hohes Stressniveau“ noch modifiziert werden. Zu wählen wäre ein Modifikationsfaktor von 10 (Item (5b), „heavy task load“, „novice“, „dynamic task“). Das Arbeiten ohne den sonst üblichen Bedien- und Beobachtungskomfort ist ungewohnt. Die permanenten durch die Störmeldequittierungen erforderlichen Arbeitsunterbrechungen begründeten die Einschätzung „dynamic task“. Damit folgt eine mit THERP ermittelte Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit von $P_{EW} = 1,6 \cdot 10^{-1}$ ($P_{5\%} = 2 \cdot 10^{-2}$, $P_{50\%} = 10^{-1}$, $P_{95\%} = 5 \cdot 10^{-1}$).

4.2.3.3 Stichprobe S29 „Anforderung eines Notstromdieselaggregats“

In der Anlage, in der das der Stichprobe zugrundeliegende Ereignis auftrat, waren nach Abschluss von Instandhaltungsarbeiten die Stromwandler der Reservenetzanbindungen zu prüfen. Ein zu prüfender Reservenetztrafo muss hierzu auf der 110 kV-Seite mit einem Strom von mindestens 50 A belastet werden. Als Last dienen die Verbraucher der redundanzgleichen 10 kV-Notstromschiene. Nach der Prüfung sollte entsprechend den Vorgaben der Prüfanweisung die Notstromschiene von Reservenetz getrennt und danach auf das Eigenbedarfsnetz geschaltet werden. Dabei wird die Notstromschiene kurzzeitig spannungslos. Um zu verhindern, dass das Reaktorschutzsystem die erneute Reservenetzschaltung oder den Start des Notstromdieselaggregats veranlasst, muss entsprechend den Vorgaben der Prüfanweisung die Reservenetz- und Dieselsperre eingelegt werden (Schlüsselschalter am Leitstand). Dieser Arbeitsschritt wurde ausgelassen. Es kam zur Auslösung der redundanzzugeordneten Notstromsignale und damit zur Meldepflicht des Ereignisses.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Bedienvorgang vom Steuerpult aus“ und dem Fehlertyp „Auslassung eines Handlungsschrittes, Aufgabenstellung in der Unterlage nicht gelesen“. Die Prüfanweisung enthält eine große Anzahl von Einzelschritten. Um der Möglichkeit einen Schritt auszulassen, vorzubeugen, können abgearbeitete Schritte in dieser Unterlage durch Erledigungsvermerke gekennzeichnet werden. Einflussfaktoren, die sich besonders fehlerfördernd auswirken, wurden nicht gefunden.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 211 Gelegenheiten für diesen Auslassungsfehler, der einmal auftrat. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 7,1 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 8,3 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 5,6 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 1,8 \cdot 10^{-2}$). Für diesen Handlungstyp und der dabei aufgetretenen Fehlerart wird in THERP ein Erwartungswert von $P_{EW} = 3,8 \cdot 10^{-3}$ vorgeschlagen (Tabelle 7 Item (2), $P_{5\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 3 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 9 \cdot 10^{-3}$).

4.2.3.4 Stichprobe S30 „Ausfall der Steuerölversorgung der Turbine“

Um die Ölversorgung der Turbine sicherzustellen, sind in periodischen Abständen die Turbinenölfilter zu reinigen. In der Anlage, aus der diese Stichprobe stammt, sind zwei parallel angeordnete Filter vorhanden, von denen immer einer im Einsatz ist und der

andere in Bereitschaft steht. Der Reservefilter wird in Betrieb genommen, wenn der in Betrieb befindliche Filter nicht mehr ausreichend durchlässig ist. Dieser Zustand wird durch das Signal „Differenzdruck Ölfilter Turbine hoch“ erkannt. Ein Anlagenwärter führt die erforderliche Umschaltung vor Ort durch und reinigt danach den zugesetzten Filter.

Vor dem Reinigen ist der Filter zu entleeren. Hierzu muss die Verbindungsarmatur zwischen Filter und Leckageölbehälter geöffnet werden, die nach dem Reinigen wieder zu schließen ist. Der gesamte Vorgang des Filterumschaltens, Entleerens, Reinigens und Wiederauffüllens ist eine häufig durchgeführte Tätigkeit. In der Systembeschreibung zur Ölversorgung der Turbine ist der Ablauf im Detail beschrieben. Da es sich um eine hoch geübte Tätigkeit handelt, werden vor Ort keine schriftlichen Unterlagen benutzt.

Bei dem dieser Stichprobe zugrundeliegenden meldepflichtigen Ereignis vergaß der Anlagenwärter die Armatur in der Verbindungsleitung zum Leckageölbehälter wieder zu schließen. Mit der nächsten Umschaltung kam es über diesen Filter zu einem kontinuierlichen Ölverlust. Innerhalb nur weniger Minuten fiel der Füllstand im Lagerölbehälter so stark ab, dass die Turbinenschutzabschaltung ausgelöst wurde.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Stellungsänderung einer Handarmatur“ und dem Fehlertyp „Vergessen den Handlungsschritt auszuführen“. Die Aufgabe ist hoch geübt. Die Benutzung von schriftlichen Unterlagen war nicht erforderlich. Die Einzelschritte sind Bestandteil der Fachkunde des Anlagenwärters. Besonders fehlerfördernde Einflüsse lagen nicht vor.

Die Stichprobe schließt mit dem meldepflichtigen Ereignis ab, da danach die Arbeiten immer mit zwei Personen durchgeführt werden und vor Ort eine Checkliste zu verwenden ist. Sie umfasst insgesamt 1470 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal aufgetreten ist. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 1 \cdot 10^{-3}$ (Fraktilen der Betaverteilung: $P_{5\%} = 1,2 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 8 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 2,7 \cdot 10^{-3}$). Für hochtrainierte Handlungen, die nur gedächtnisgestützt ausgeführt werden, wird in der Methode THERP kein passender Wert vorgeschlagen.

4.2.3.5 Stichprobe S31 „Ausfall der Hauptwärmesenke beim Abfahren der Anlage“

Am Ende des Abfahrens der Anlage, in der das hier beschriebene meldepflichtige Ereignis eintrat, wird das Speisewassersystem auf den sogenannten Spülbetrieb umgeschaltet. Der Reaktor ist abgeschaltet. Die RDB Bespeisung erfolgt über das Steuerstabspülwasser- und Dichtungssperwassersystem. Die Nachwärme wird an die Hauptwärmesenke abgeführt. Vor der Umschaltung auf Spülbetrieb muss der hierfür zuständige Operateur vom Hauptleitstand aus die Nachfahrkolben der Speisewasser-rückschlagventile einfahren, um eine weitere Bespeisung des RDBs über das Speisewassersystem zu verhindern. Hierzu ist zunächst die Schlüsselschaltfreigabe einzulegen und danach die für alle vier Magnetvorsteuerventile gemeinsame Kommandotaste zu betätigen. Der Operateur vergaß, die Schlüsselschalterfreigabe einzulegen. Dadurch fahren die Nachfahrkolben nicht ein, obwohl die Stellbefehle erteilt wurden. In der Folge wurde der RDB überspeist. Das Reaktorleitungssystem löste die Durchdringungsabschluss-signale aus, wodurch die Hauptwärmesenke nicht mehr zur Verfügung stand.

Die Stichprobe charakterisiert Schalthandlungen am Leitstand, die gedächtnisgestützt auszuführen sind. Die Anweisungen im Abfahrprogramm enthielten keinen Hinweis auf die Betätigung des Schlüsselschalters. Der Zusammenhang „Schlüsselschalter/Kommandotaste“ muss erinnert werden (Erfahrungswissen), d.h. es liegt der Fehlertyp „Auslassen einer Schalthandlung, Handlungsschritt nicht erinnert“ vor. Eine Reihe von ungünstigen Einflussfaktoren hat sich fehlerfördernd ausgewirkt.

- Der sehr hohe Aufgabendruck verursachte eine hohe Stressbelastung.
- Die Blockierung der Ventile ist vergleichsweise selten durchzuführen.
- Die Störmeldelampe an der GBA-Tafel ist zu weit entfernt vom Arbeitsplatz des Operateurs und wurde von ihm als Lauflampe interpretiert.
- KMA-Sammelmeldung und Stellungsrückmeldung am Hauptleitstand wurden nicht kontrolliert.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 28 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal auftrat. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 5,2 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 6,3 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 4,2 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 1,3 \cdot 10^{-1}$). Für wenig geübte Handlungen, die gedächtnisgestützt unter dem Einfluss

weiterer ungünstiger Faktoren auszuführen sind, wird in der Methode THERP kein passender Wert vorgeschlagen.

4.2.3.6 Stichprobe S32 „Druckhalter-Füllstandsüberbrückung bei Abfahren zur Revision nicht betätigt“

Zur Durchführung eines Brennelementwechsels muss der Füllstand im Primärkreis einer DWR-Anlage auf das Niveau „Mitte-Loop“ abgesenkt werden. Vor dem Absenken des Füllstandes im Druckhalter ist im Anlagenzustand „unterkritisch kalt“ das Reaktorschutzsystem-Anregekriterium „Druckhalterfüllstand tief“ zu überbrücken. Die entsprechende Schaltanweisung wird in der sehr umfangreichen Abfahrprozedur beschrieben, die Bestandteil des Betriebshandbuches ist. Nach Erteilen der Zielvorgabe „Absenken des Primärkreisfüllstandes auf Mitte-Loop“ durch den Schichtleiter führt der Reaktorfahrer den Absenkvorgang eigenverantwortlich durch.

Das Kriterium „Druckhalterfüllstand tief“ wird durch den Reaktorfahrer mit Hilfe eines Schlüsselschalters von der Warte aus überbrückt. Unterlässt er diese Schalthandlung, so kommt es bei noch angekoppeltem Reaktorschutzsystem zur Fehlauflösung der Notkühlkriterien und damit zur Auslösung der Notkühlsignale. Das Ergebnis ist meldepflichtig.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Auslassen einer Schalthandlung“ und dem Fehlertyp „in einer schriftlichen Unterlage beschriebener Handlungsschritt wurde unterlassen“. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass aufgrund des Aufgabendrucks in dieser Situation von einer erhöhten Stressbelastung auszugehen ist und die Abfahrprozedur eine große Zahl von Teilaufgaben beschreibt.

In den deutschen DWR-Anlagen liegen im hier zugrundegelegten Auswertzeitraum 1986 bis 1996 bzgl. der beschriebenen Handlungssituation und der Fehlerauswirkungen annähernd vergleichbare technische und handlungsspezifische Gegebenheiten vor. Die Stichprobe umfasst somit die Betriebserfahrung aus insgesamt 14 deutschen DWR-Anlagen und damit insgesamt 180 Abfahrvorgänge in den Zustand „unterkritisch kalt, abgesenkter Füllstand“. Der Auslassungsfehler ist zweimal aufgetreten. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 1,4 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Beta-Verteilung $P_{5\%} = 3,2 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 1,2 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 3 \cdot 10^{-2}$).

Für die Wahrscheinlichkeit, dass ein in einer Prozedur beschriebener Handlungsschritt bei moderat erhöhtem Stressniveau ausgelassen wird, obwohl die Prozedur benutzt wird, schlägt die Methode THERP eine Wahrscheinlichkeit von $P_{EW} = 7,5 \cdot 10^{-3}$ vor (Tabelle 7, Item (2) und Tabelle 16, Items (4a), $P_{5\%} = 2 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 6 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 1,8 \cdot 10^{-2}$). Falls die Prozedur keine Erledigungsvermerk anbietet, steigt dieser Wert auf $P_{EW} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ (Tabelle 7, Item (4)).

4.2.3.7 Stichprobe S33 „Auslösung der Reaktorschnellabschaltung bei Prüfungen im Schnellabschaltsystem“

Der hier beschriebene Handlungsfehler trat bei der wiederkehrenden Prüfung des Schnellabschaltsystems der von dem meldepflichtigen Ergebnis betroffenen Anlage auf. Hierbei sind u. a. die Funktionen des Tankschließventils und des Schnellöffnungsventils zu prüfen. Um zu verhindern, dass es zu einer Schnellabschaltung kommt, muss immer eine der beiden Armaturen in Richtung „Auf“ blockiert werden (siehe hierzu auch Ausführungen zu Stichprobe S8). Beim Prüfen des Schnellöffnungsventils in der Redundanz 4 wurde vergessen, dass in Reihe liegende andere Ventil zu blockieren. Der volle Systemdruck von 160 bar stand am Tankschließventil an und drückte dieses auf, so dass es zum Einschließen der Abschaltstäbe und damit zur RESA kam.

Die Stichprobe ist charakteristisch für in Prozeduren beschriebene Schalthandlungen, die trotz Benutzung der Prozedur ggf. nicht ausgeführt werden (Fehlertyp „in schriftlicher Unterlage beschriebener Handlungsschritt wird unterlassen“). Die Prüfschritte sind in einer Prüfanweisung, die eine große Zahl von Einzelschritten enthält, beschrieben. Um der Möglichkeit einen Schritt auszulassen vorzubeugen, können abgearbeitete Schritte in dieser Unterlage durch Erledigungsvermerke gekennzeichnet werden. Einflussfaktoren, die sich besonders fehlerfördernd auswirken, wurden nicht gefunden.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 440 Gelegenheiten für diesen Auslassungsfehler. Bei der Inspektion des Tankschließventils wurde festgestellt, dass das Kniegelenk des Ventils dejustiert war. Ggf. hätte das Tankschließventil dem Systemdruck standgehalten, wenn das Kniegelenk korrekt eingestellt gewesen wäre. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass schon früher ein solcher Fehler aufgetreten ist, aber nicht zur RESA und damit nicht zur Meldepflicht führte. Für die Anzahl der Fehler kann nur eine Untergrenze ($n \geq 1$) angegeben werden.

Auf der Grundlage dieser Stichprobe ergibt sich für den Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ein Wert von $P_{EW} \geq 3,4 \cdot 10^{-3}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 4 \cdot 10^{-4}$, $P_{50\%} = 2,7 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 8,8 \cdot 10^{-3}$). Daten für einen solchen Auslassungsfehler werden in Tabelle 7 des Datenbestandes der Methode THERP vorgeschlagen. Für die hier beschriebene Handlungssituation wäre Item (2) zu wählen, d. h. $P_{EW} = 3,8 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 3 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 9 \cdot 10^{-3}$).

4.2.3.8 Stichprobe S34 „Auslösung der Schnellabschaltung beim Anfahren der Anlage“

Die DWR-Anlage, in der das hier beschriebene meldepflichtig Ereignis eintrat, befand sich im Anfahrbetrieb und hatte bereits 16 % Reaktorleistung erreicht. Durch Zuschaltung der ihm zugeordneten Hauptkühlmittelpumpe sollte nun ein weiterer Dampferzeuger an der Wärmeabfuhr beteiligt werden. Aufgrund der Undichtigkeiten der Speisewasserregelventile ist der Hauptabsperrschieber in der Speisewasserleitung zu diesem Dampferzeuger geschlossen und muss vor der Zuschaltung geöffnet werden. Der Hauptabsperrschieber wurde jedoch nicht geöffnet. Dadurch fiel das Wasserinventar im Dampferzeuger nach der Zuschaltung der Hauptkühlmittelpumpe schnell ab. Bei Erreichen der Schutzgrenzwerte „Niveau zu tief“ löste das Sicherheitssystem die Reaktorschnellabschaltung aus.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Ausführung einer Schalthandlung von der Warte aus“ und dem Fehlertyp „Auslassen der Schalthandlung, Aufgabenstellung nicht erinnert“. Die Anweisung zum Öffnen der Armatur war vor dem Ereignis nicht in der Anfahrprozedur enthalten. Der Zusammenhang „Absperrarmatur öffnen vor Zuschaltung der Hauptkühlmittelpumpe“ muss erinnert werden (Erfahrungswissen). Als besonders fehlerfördernd wirkte sich aus, dass die Aufgabe vergleichsweise selten durchzuführen ist und aufgrund des hohen Aufgabendrucks von zumindest moderat erhöhtem Stressniveau auszugehen ist.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 20 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal auftrat. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 7,1 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 8,9 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 5,8 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 1,8 \cdot 10^{-1}$). Die Stichprobe weist Parallelen zu Stichprobe S31 auf. Für vergleichsweise wenig geübte Handlungen, die gedächtnisgestützt unter Einfluss weiterer ungüns-

tiger Faktoren auszuführen sind, wird in der Methode THERP kein passender Wert vorgeschlagen.

4.2.3.9 Stichprobe S35 „Anforderung eines Notstromdieselaggregats“

Nach Abschluss der Instandhaltungsarbeiten an einer der 6 kV-Notstromschienen während der Revision sollte diese wieder auf das Anlagennetz zurückgeschaltet werden. Hierzu muss vor dem Schließen des Einspeiseschalters vor Ort am Schaltschrank auf der Schrankrückseite der Arbeitserde entfernt werden. Hierbei handelt es sich um eine Metallklammer, die an den spannungstragenen Schienen befestigt wird und die die Verbindung zur Erdungsschiene herstellt. Der zuständige Operateur, ein erfahrener Fachmann, vergaß, die Arbeitserde zu entfernen und löste beim Schließen des 6 kV-Einspeiseschalters einen Erdschluss aus. In der Folge sprachen die Schutzeinrichtungen auch innerhalb des Eigenbedarfnetzes an und es kam zum Start von Notstromdieselaggregaten. Ereignisse, bei denen Notstromdieselaggregate angefordert werden, sind meldepflichtig.

Die Stichprobe ist charakteristisch für eine manuell in der Schaltanlage durchzuführende Teilaufgabe. Das Wissen um die Notwendigkeit, vor der Zuschaltung die Arbeitserde zu entfernen, wurde bis zu diesem Ereignis als Bestandteil des Fachkundewissens betrachtet. Erst danach wurde ein geeigneter Hinweis in die Rückschaltliste aufgenommen. Ursächlich für den Unterlassungsfehler war das Vergessen eines Schrittes innerhalb einer Reihe von Handlungsschritten. Fehlerfördernd wirkt sich aus, dass dieser Handlungsschritt nicht besonders häufig ausgeführt wird und auch in der zu verwendenden Unterlage keine Hinweise vorhanden waren.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 48 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal auftrat. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 3,0 \cdot 10^{-2}$ (Fraktilen der Betaverteilung: $P_{5\%} = 3,7 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 2,4 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 7,9 \cdot 10^{-2}$). Für das Vergessen eines Handlungsschrittes, der zu erinnern ist, werden in THERP die Fehlerwahrscheinlichkeiten $P_{EW} = 8 \cdot 10^{-2}$ und $1,6 \cdot 10^{-2}$ (gut geübt, Tabelle 7, Item (5 #)) vorgeschlagen. Die Zahlen in dieser Tabelle setzen voraus, dass der Teilschritt in der Arbeitsunterlage beschrieben ist, die allerdings in der zu beurteilenden Handlungssituation nicht verwendet wird. Diese Zahlen können also nicht ohne weiteres auf die dieser Stichprobe zugrundeliegenden Situation übertragen werden.

4.2.3.10 Stichprobe S36 „Fehlöffnen des Druckhalterabblaseventils“

Im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen der leittechnischen Einrichtungen zur Regelung und Begrenzung der Reaktorleistung werden auch die Meldewege dieser Leittechnik geprüft. Die Prüfung wurde bis zum Ereigniszeitpunkt bei Leistungsbetrieb der Anlage durchgeführt. Die Meldungen werden in der Auslöseebene erzeugt, in der ein redundanter Aufbau der Signale nicht mehr gegeben ist. Deshalb muss vor der Meldewegeprüfung ein Sperrsignal aufgeschaltet werden, um so ein Öffnen des Druckhalterabblaseventils durch das Aufschalten der Prüfspannung zu verhindern. Der Operateur schaltete das Sperrsignal nicht zu, so dass es beim Einbringen der Prüfspannung zum Öffnen des Druckhalterabblaseventils kam.

Die Stichprobe ist charakteristisch für einen manuell vor Ort am Leittechnikschrank durchzuführenden Handlungsschritt, der unterlassen wurde. Die Handlungen sind in einer Prüfanweisung beschrieben. Auf die Notwendigkeit, das Sperrsignal aufzuschalten, wird dort allerdings nicht eindeutig hingewiesen. Besonders fehlerfördernd wirkte sich zusätzlich aus, dass die Prüfung erstmalig durchgeführt wurde und somit auch keine ausreichende Erfahrung damit vorlag.

Nach dem Ereignis wurde der technische Ablauf der Prüfung geändert. Die Prüfung wird bei Anlagenstillstand durchgeführt. Die Stichprobe umfasst somit nur eine Gelegenheit für das Auftreten dieses Fehlers. Wie bereits bei den Stichproben S24 bis S26 beschrieben, kann daher die quantitative Auswertung nicht abschließend sein. Ziel ist es, die Anzahl der Stichproben mit vergleichbar ungünstigen Faktoren weiter zu erhöhen, um durch die Anwendung der zweiten Stufe der Methode von Bayes den Stichprobenumfang und damit die Auswertungsbasis zu verbreitern. Auf der Grundlage dieser Stichprobe ergibt sich eine Fehlerwahrscheinlich von $P_{EW} = 7,5 \cdot 10^{-1}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 2,3 \cdot 10^{-1}$, $P_{50\%} = 8,4 \cdot 10^{-1}$, $P_{95\%} = 9,9 \cdot 10^{-1}$). In den Datentabellen der Methode THERP fehlen Werte zu Auslassungsfehlern, die unter vergleichbar ungünstigen Randbedingungen auftreten können.

4.2.3.11 Stichprobe S37 „Messkanal der Mitte-Loop Füllstandsmesseinrichtung nicht rechtzeitig in Betrieb genommen“

Die Anlage sollte zur Durchführung des Brennelementwechsels abgefahren werden und hatte bereits den Betriebszustand „unterkritisch, kalt“ erreicht. Nun sollte mit der

Absenkung des Füllstands im Primärkreis auf das Niveau „Mitte Loop“ fortgesetzt werden. Gemäß BHB sind zuvor beide „Mitte-Loop“ Füllstandsmesseinrichtungen in Betrieb zu nehmen. Im hier beschriebenen Fall wurde jedoch nur eine Messeinrichtung zugeschaltet. Eine Füllstandsabsenkung auf Niveau „Mitte-Loop“ mit nur einer verfügbaren Messeinrichtung ist meldepflichtig.

Die Stichprobe ist charakteristisch für den Handlungstyp „Durchführung einer vor Ort durchzuführenden Aufgabe“ und den Fehlertyp „Auslassen einer Teilhandlung, schriftlich formulierte Aufgabenstellung falsch verstanden“. Ursache für den Auslassungsfehler ist somit ein kognitiver Fehler beim Lesen und Verstehen der im BHB beschriebenen Aufgabenstellung. Der Schichtarbeiter interpretierte die RDB-Anweisung fehlerhaft dahingehend, dass nur eine der beiden Messeinrichtungen zuzuschalten ist. Fehlerfördernd hat sich ausgewirkt, dass die Anweisung missverständlich formuliert war und in diesem Anlagebetriebszustand auf Grund des hohen Aufgabendrucks von einer erhöhten Stressbelastung auszugehen ist.

Die Stichprobe umfasst insgesamt 40 Gelegenheiten für diesen Fehler, der einmal aufgetreten ist. Der Erwartungswert der Fehlerwahrscheinlichkeit ergibt sich daraus zu $P_{EW} = 3,6 \cdot 10^{-2}$ (Fraktile der Betaverteilung: $P_{5\%} = 4,4 \cdot 10^{-3}$, $P_{50\%} = 2,9 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 9,4 \cdot 10^{-2}$). In Tabelle 7 der Methode THERP werden Wahrscheinlichkeiten für das Auslassen eines Handlungsschrittes vorgeschlagen, wenn die Schritte in schriftlichen Unterlagen dokumentiert sind. Diesen Werten liegt der Fehlermechanismus „Anweisung wird nicht gelesen“ zugrunde. Sie können somit nicht auf die in der Stichprobe beobachtete Fehlerursache übertragen werden.

4.3 Datentabellen

4.3.1 Ausführungsfehler, Fehler bei der Handlungsregulation

Stichproben-Nr.	Handlung	Fehler	Einflüsse	Stichprobenparameter m/n	Fehlerwahrscheinlichkeiten $P_{5\%}$; P_{EW} ; $P_{95\%}$
S1	Kommandotaste betätigen	Falsche Taste betätigt	Greifraum, gleich konstruiert; sonst gut gestaltet	948/1	$1,8 \cdot 10^{-4}$; $1,6 \cdot 10^{-3}$; $4 \cdot 10^{-3}$;
S2	Schraubhülse, Si-Ventil auf Markierung eindrehen	Zu große Abweichung	Große Genauigkeit erforderlich	913/1	$1,9 \cdot 10^{-4}$; $1,6 \cdot 10^{-3}$; $4 \cdot 10^{-3}$;
S3	Kommandotaste betätigen	Taste zu spät betätigt	Kurze Zeitspanne zwischen Erkennen und Ausführen	608/2	$9,4 \cdot 10^{-4}$; $4,1 \cdot 10^{-3}$; $9 \cdot 10^{-3}$
S4	Einbringen eines Baugruppensimulationsstiftes	Simulation an falscher Baugruppe	Greifraum, gleich konstruiert	48/1	$3,6 \cdot 10^{-3}$; $3,1 \cdot 10^{-2}$; $7,8 \cdot 10^{-2}$
S5	Drehschalter betätigen	Falscher Drehschalter betätigt	Greifraum, gleich konstruiert	1332/1	$1,3 \cdot 10^{-4}$; $1,1 \cdot 10^{-3}$; $2,9 \cdot 10^{-3}$;
S6	Kommandotaste betätigen	Falsche Taste betätigt	Greifraum, gleich konstruiert; sonst gut gestaltet	400/1	$4,4 \cdot 10^{-4}$; $3,7 \cdot 10^{-3}$; $9,7 \cdot 10^{-3}$

Stichproben-Nr.	Handlung	Fehler	Einflüsse	Stichprobenparameter m/n	Fehlerwahrscheinlichkeiten $P_5 \%$; P_{EW} ; $P_{95 \%}$
S7	Prüfkabel an Baugruppe anschließen	Prüfkabel an falsche Baugruppe angeschlossen	Greifraum, gleich konstruiert, Farbkennzeichnung	1512/1	$1,2 \cdot 10^{-4}$; $9,9 \cdot 10^{-4}$; $2,6 \cdot 10^{-3}$
S8	Kommandotaste betätigen	Falsche Taste betätigt	Greifraum, gleich konstruiert; sonst gut gestaltet, aber hohe Belegungsdichte	440/1	$4 \cdot 10^{-4}$; $3,4 \cdot 10^{-3}$; $8,8 \cdot 10^{-3}$
S9	Druckschalter betätigen	Falschen Druckschalter betätigt	Greifraum, gleich konstruiert	1146/1	$1,5 \cdot 10^{-4}$; $1,3 \cdot 10^{-3}$; $3,4 \cdot 10^{-3}$
S10	Kommandotaste betätigen	Taste zu früh betätigt	Erhöhter Stress, Bedienfolge; kurze Mindestwartezeit	81/1	$2,2 \cdot 10^{-3}$; $1,8 \cdot 10^{-2}$; $4,7 \cdot 10^{-2}$
S11	Kommandotaste betätigen	Falsche Taste betätigt	Greifraum, gleich konstruiert; sonst gut gestaltet	170/1	$1 \cdot 10^{-3}$; $8,8 \cdot 10^{-3}$; $2,3 \cdot 10^{-2}$
S12	Sonstige Tätigkeit auf Bedienpultoberfläche	Schlüsselschalter versehentlich betätigt	Keine Schutzmaßnahme gegen Fehlbedienung	1200/1	$1,5 \cdot 10^{-4}$; $1,2 \cdot 10^{-3}$; $3,3 \cdot 10^{-3}$
S13	Schlüsselschalter betätigen	Falschen Schlüsselschalter betätigt	Greifraum, gleich konstruiert	152/1	$1,2 \cdot 10^{-3}$; $9,8 \cdot 10^{-3}$; $2,5 \cdot 10^{-2}$
S14	Kommandotaste betätigen	Taste nicht ausreichend lang betätigt	Lange Betätigungsdauer	1488/1	$1,2 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-3}$; $2,6 \cdot 10^{-3}$;

Stichproben-Nr.	Handlung	Fehler	Einflüsse	Stichprobenparameter m/n	Fehlerwahrscheinlichkeiten P _{5 %} ; P _{EW} ; P _{95 %} ;
S15	Regelungsaufgabe; diskontinuierlich	Regelabweichung nicht schnell genug reduziert	Erhöhte Stressbelastung, schnelle Reaktion erforderlich	28/1	$6,3 \cdot 10^{-3}$; $5,2 \cdot 10^{-2}$; $1,3 \cdot 10^{-1}$;

4.3.2 Ausführungsfehler, fehlerhafte Aufgabenstellung

Stichproben-Nr.	Handlung	Fehler	Einflüsse	Stichprobenparameter m/n	Fehlerwahrscheinlichkeiten P _{5 %} ; P _{EW} ; P _{95 %} ;
S16	Remontage von Bauteilen	Einbaulage falsch erinnert	Keine schriftliche Unterlage; Ähnlichkeit falsche/korrekte Handlung	36/1	$4,9 \cdot 10^{-3}$; $4 \cdot 10^{-2}$; $1 \cdot 10^{-1}$;
S17	Prüfkabel an Schrankbuchsen anschließen	Lage der Anschlussbuchsen falsch erinnert	Räumliche Nähe, vergleichbare Konstruktion	33/1	$5,4 \cdot 10^{-3}$; $4,4 \cdot 10^{-2}$; $1,1 \cdot 10^{-1}$;
S18	Zusammenstellen von Arbeitsunterlagen	Falsche Erinnerung an erforderliche Unterlagen	Inhaltliche Ähnlichkeit der korrekten und falschen Unterlage	84/1	$2,1 \cdot 10^{-3}$; $1,7 \cdot 10^{-2}$; $4,6 \cdot 10^{-2}$;
S19	Remontage von Bauteilen	Falsche Erinnerung an zu betätigendes Bauteil	Vergleichbare Bedienung und räumliche Nähe von korrektem und falschem Bauteil	888/1	$2 \cdot 10^{-4}$; $1,7 \cdot 10^{-3}$; $4,4 \cdot 10^{-3}$;
S20	Messsignalkalibrierung	Lage des Kalibrierungspotentiometers falsch erinnert	Beschriftung des korrekten und falschen Potentiometers sehr ungünstig gestaltet	18/1	$9,9 \cdot 10^{-3}$; $7,9 \cdot 10^{-2}$; $2 \cdot 10^{-1}$

Stichproben-Nr.	Handlung	Fehler	Einflüsse	Stichprobenparameter m/n	Fehlerwahrscheinlichkeiten $P_5\%$; P_{EW} ; $P_{95}\%$
S21	Erteilen einer Arbeitsfreigabe	Falsche Vorstellung vom Zustand der Anlage, Arbeitsfreigabe fehlerhaft erteilt	Erhöhter Stress, Kommunikationsvorgang nicht durchgeführt	17/1	$1 \cdot 10^{-2}$; $8,3 \cdot 10^{-2}$; $2,1 \cdot 10^{-1}$;
S22	Abschalten von Sicherungsautomaten	Falsche Erinnerung an die Lage der Automaten	Defizite in der Kennzeichnung und den Arbeitsunterlagen, vergleichbare Konstruktion, räumliche Nähe vorangehender Handlung	4/2	$1,7 \cdot 10^{-1}$; $5 \cdot 10^{-1}$; $8,3 \cdot 10^{-1}$;
S23	Kontrolle von Zustandsmeldelampen	Fehlbedienung einer Kommandotaste; Aufgabenstellung falsch erinnert	Keine Hinweise auf technische Unterschiede bei Tätigkeit in zwei verschiedenen Blöcken	56/1	$3,2 \cdot 10^{-3}$; $2,6 \cdot 10^{-2}$; $6,8 \cdot 10^{-2}$;

4.3.3 Auslassungsfehler

Stichproben-Nr.	Handlung	Fehler	Einflüsse	Stichprobenparameter m/n	Fehlerwahrscheinlichkeiten $P_5 \%$; P_{EW} ; $P_{95} \%$
S27	Pumpenförderhöhe diskontinuierlich erhöhen	Handlungsschritt nicht erinnert	Erhöhtes Stressniveau durch hohen Aufgabendruck	50/1	$3,5 \cdot 10^{-3}$; $2,9 \cdot 10^{-2}$; $7,6 \cdot 10^{-2}$;
S28	Transport von Brennelementen mit Lademaschine	Handlungsschritt nicht erinnert	Hoher Stress durch Zeitdruck, Designdefizite und Störungen bei der Arbeit	7/1	$2,6 \cdot 10^{-2}$; $1,9 \cdot 10^{-1}$; $4,4 \cdot 10^{-1}$;
S29	Betätigung eines Schlüsselalters	Aufgabenstellung in Arbeitsunterlage nicht gelesen	Umfangreiche Arbeitsunterlage; Erledigungsvermerke vorhanden	211/1	$8,3 \cdot 10^{-4}$; $7,1 \cdot 10^{-3}$; $1,8 \cdot 10^{-2}$
S30	Positionsänderung einer Handarmatur	Handlungsschritt nicht erinnert	Hochgeübte Aufgabe; keine besonders fehlerfördernde Einflüsse	1470/1	$1,2 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-3}$; $2,7 \cdot 10^{-3}$
S31	Betätigung eines Schlüsselalters	Handlungsschritt nicht erinnert	Vergleichsweise selten durchzuführende Handlung muss erinnert werden; erhöhter Stress ergonomische Defizite	28/1	$6,3 \cdot 10^{-3}$; $5,2 \cdot 10^{-2}$; $1,3 \cdot 10^{-1}$

Stichproben-Nr.	Handlung	Fehler	Einflüsse	Stichprobenparameter m/n	Fehlerwahrscheinlichkeiten P ₅ %; P _{EW} ; P ₉₅ %;
S32	Überbrückungsschalter betätigen	Aufgabenstellung in Arbeitsunterlagen nicht gelesen	Erhöhtes Stressniveau durch hohen Aufgabendruck	180/2	$3,2 \cdot 10^{-3}$; $1,4 \cdot 10^{-2}$; $3 \cdot 10^{-2}$
S33	Armaturblockierung nicht eingefahren	Aufgabenstellung in Arbeitsunterlage nicht gelesen	Umfangreiche Arbeitsunterlage; Erledigungsvermerke vorhanden	440/≥ 1	$\geq 4 \cdot 10^{-4}$; $\geq 3,4 \cdot 10^{-3}$; $\geq 8,8 \cdot 10^{-3}$
S34	Öffnen einer Absperrarmatur	Handlungsschritt nicht erinnert	Vergleichsweise selten durchzuführende Handlung; erhöhter Stress durch Aufgabendruck	20/1	$8,9 \cdot 10^{-3}$; $7,1 \cdot 10^{-2}$; $1,8 \cdot 10^{-1}$
S35	Entfernen der Arbeitserde vor Ort	Handlungsschritt nicht erinnert	Vergleichsweise selten durchzuführende Handlung	48/1	$3,7 \cdot 10^{-3}$; $3 \cdot 10^{-2}$; $7,9 \cdot 10^{-2}$
S37	Inbetriebnahme einer Messeinrichtung	Handlungsschritt ausgelassen; Anweisung falsch verstanden	Missverständlich formulierte schriftliche Anweisung; erhöhtes Stressniveau durch Aufgabendruck	40/1	$4,4 \cdot 10^{-3}$; $3,6 \cdot 10^{-2}$; $9,4 \cdot 10^{-2}$

4.3.4 Stichproben mit zu niedrigem Stichprobenumfang

Stichproben-Nr.	Handlung	Fehler	Einflüsse	Stichprobenparameter m/n	Fehlerwahrscheinlichkeiten $P_{5\%}$; P_{EW} ; $P_{95\%}$
S24	Beantworten einer KMA-Meldung	KMA-Meldung falsch interpretiert, nicht korrekt beantwortet	Sammelmeldung, gehend quittierbar, laufende Arbeiten könnten Meldung auslösen	4/4	$6,4 \cdot 10^{-1}$; $9 \cdot 10^{-1}$; 1
S25	Beantworten einer Störmeldelampe	Störmeldelampe falsch interpretiert, falsch beantwortet	Ungenaue mündliche Anweisung; gehend quittierbar, laufende Arbeiten könnten Meldung auslösen	4/4	$6,4 \cdot 10^{-1}$; $9 \cdot 10^{-1}$; 1
S26	Ungewöhnliches Verhalten einer Zustandsmeldelampe wahrnehmen	Ungewöhnliches Verhalten der Meldelampe nicht wahrgenommen	Lampe im Sichtfeld; Zustandskontrolle aber kein Tätigkeitsziel	1/1	$2,3 \cdot 10^{-1}$; $7,5 \cdot 10^{-1}$; $9,9 \cdot 10^{-1}$;
S36	Sperrsignal vor Ort aufschalten	Handlungsschritt nicht erinnert	Keine ausreichende Erfahrung; keine schriftlichen Hinweise	1/1	$2,3 \cdot 10^{-1}$; $7,5 \cdot 10^{-1}$; $9,9 \cdot 10^{-1}$;

5 Bewertung der Daten aus der deutschen Betriebserfahrung

5.1 Analyse der Daten aus der deutschen Betriebserfahrung

Im Folgenden werden die aus den Stichproben gewonnenen einzelnen Datenpunkte einer übergeordneten Betrachtung unterzogen, mit dem Ziel, Erkenntnisse zur Validität von Daten der empfohlenen Bewertungsmethode THERP oder zu neuen Daten zu gewinnen. Die übergeordnete Betrachtung folgt dabei dem im Abschnitt 4.1 beschriebenen Konzept, Fehler entsprechend ihrer äußeren Wirkung und den wesentlichen inneren kognitiven Ursachen zu klassifizieren. Hinsichtlich der äußeren Wirkungen wird unterschieden zwischen Ausführungsfehlern und Auslassungsfehlern. Die wesentlichen kognitiven Ursachen „Fehler bei der Handlungsregulation“ sowie „Fehler bei der Generierung der Aufgabenstellung“ basieren auf dem in der Abbildung 5-1 dargestellten in der Arbeitswissenschaft verwendeten Kognitionsmodell. Sowohl bei der Generierung der Aufgabenstellung als auch bei der Handlungsausführung können Fehler bei der Verarbeitung von Informationen, die von Außen kommen oder im Gedächtnis gespeichert sind, zu Handlungsfehlern führen. Eine weitergehende differenzierte Betrachtung der Verarbeitung von Informationen entsprechend den in der Abbildung 5-1 dargestellten Stufen „Wahrnehmen“, „Unterscheiden“, „Interpretieren“, „Diagnose“, „Entscheiden“ und „Planen“ ist nicht sinnvoll, da sich die in den Stichproben beschriebenen Fehlerursachen in der Regel nicht mehr mit ausreichender Sicherheit einer oder mehrerer dieser Stufen zuordnen lassen.

5.1.1 Ausführungsfehler aufgrund von Fehlern bei der Handlungsregulation

Zu Ausführungsfehlern aufgrund von Fehlern bei der Handlungsregulation liegen insgesamt 15 Stichproben vor. 8 dieser Stichproben charakterisieren Handlungsfehler, für die in der Methode THERP Daten vorgeschlagen werden und somit zur Verifikation dieser vorgeschlagenen Daten herangezogen werden können. Die anderen 7 Stichproben beziehen sich auf Aufgaben und Fehler für die keine THERP Daten vorgeschlagen werden. Sie tragen zur Erweiterung des Datenbestandes bei.

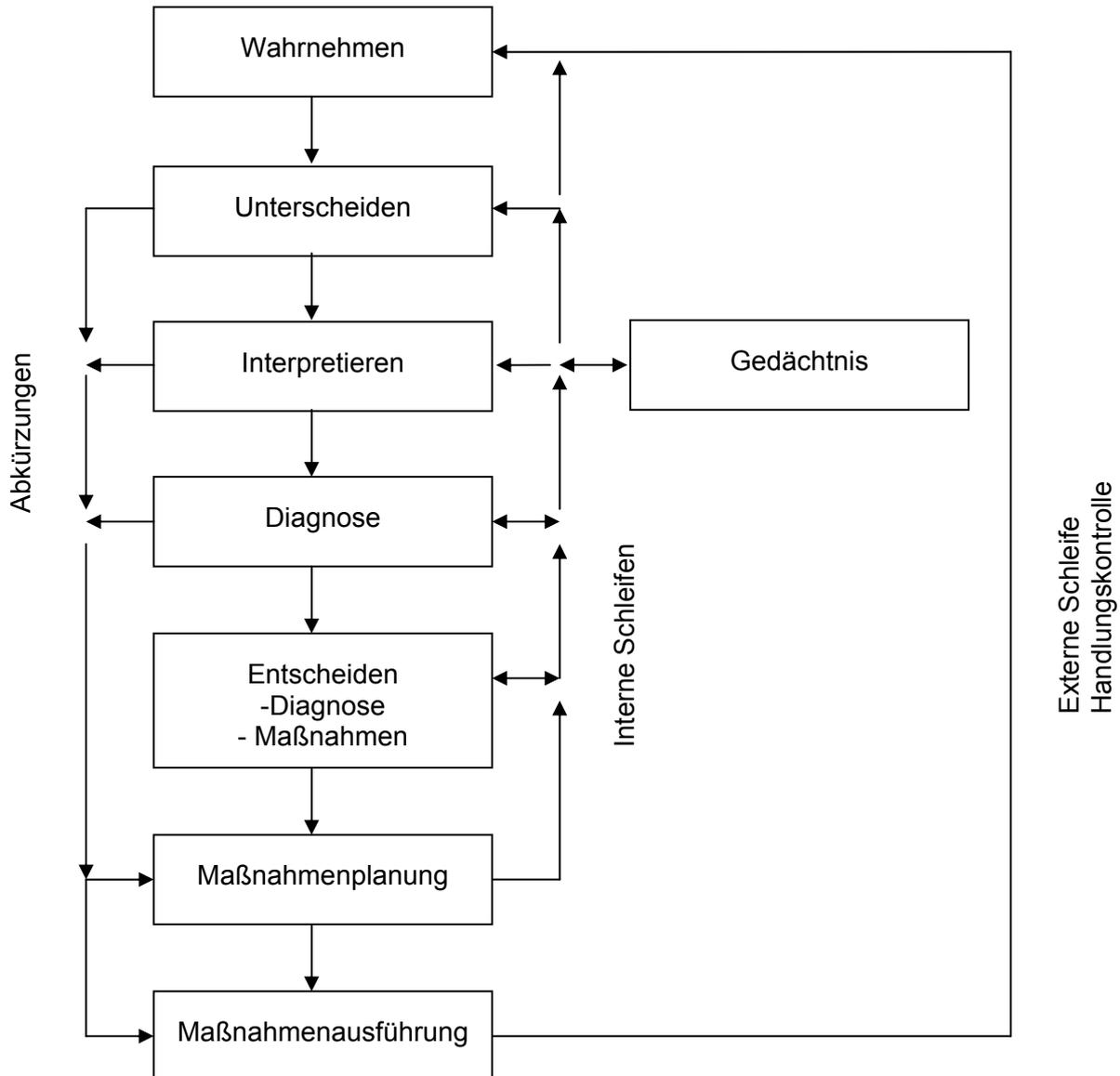


Abb. 5-1 Kognitionsmodell

- Verwechslungsfehler bei Schalthandlungen an Bedienpulten
 Zu Verwechslungsfehlern bei Schalthandlungen an Bedienpulten werden in THERP, Tabelle 12, Item 2, 3 und 4 folgende Fehlerwahrscheinlichkeiten vorgeschlagen
 - $P_{EW} = 3,8 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 1 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 9 \cdot 10^{-3}$), wenn die Bedienelemente nur beschriftet sind
 - $P_{EW} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 3,5 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 3 \cdot 10^{-3}$), wenn zusätzlich das Gestaltungsmerkmal „funktionale Gruppierung“ beachtet wurde
 - $P_{EW} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 5 \cdot 10^{-5}$, $P_{95\%} = 5 \cdot 10^{-3}$), wenn zusätzlich bildhafte Darstellungen eingesetzt werden.

Die Daten setzen voraus, dass ein falsches Bedienelement betätigt wird, obwohl zuvor die Aufgabenstellung korrekt erarbeitet wurde. Die vorhergesagten Erwartungswerte der Fehlerwahrscheinlichkeit sind in der Größenordnung $1 \cdot 10^{-3}$ und variieren je nach Qualität des ergonomischen Designs um etwa Faktor 3.

Zu Fehlbedienungen an Schaltpulten, die auf Fehler bei der Handlungsregulation zurückzuführen sind liegen die Stichproben S1, S5, S6, S8, S9, S11 und S13 vor (vgl. Abschnitt 4.3). Charakteristisch für alle Stichproben ist, dass sich das fälschlicherweise betätigte Handlungsobjekt im Greifraum der handelnden Person befand, vergleichbar aussah und auch vergleichbar zu bedienen war. Unterschiede lagen im ergonomischen Design des Bedienpultes vor. Bei den Stichproben S1, S6, S8 und S11 waren die Bedienoberflächen ergonomisch deutlich besser gestaltet als bei den Stichproben S5, S9 und S13 (Verwendung von Fließbildern und farbliche Kennzeichnung). Besonders fehlerfördernde Gestaltungsmängel (z. B. spiegelbildliche Anordnungen) lagen bei keiner der Stichproben vor.

Postuliert man einen relevanten Einfluss der Gestaltungsmerkmale „Fließbilder, farbliche Kennzeichnung“, so können die Stichproben S1, S6, S8 und S11 sowie die Stichproben S5, S9 und S13 zusammengefasst und mit der Bayes'schen Methode ausgewertet werden. Dies führt zu folgenden Resultaten

- $P_{EW} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 4,1 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 2,7 \cdot 10^{-3}$),
Gestaltungsmittel Beschriftung
- $P_{EW} = 2,3 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 8,5 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 4,3 \cdot 10^{-3}$),
zusätzlich Fließbilddarstellungen oder farbliche Kennzeichnung

Der in THERP vorgeschlagene Modifikationsfaktor 3 zur Berücksichtigung des Einflusses einer ergonomisch weniger günstig gestalteten Bedienoberfläche lässt sich durch die Stichprobenresultate nicht bestätigen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Einflussfaktoren „Greifraum“, „ähnliches Aussehen der Bedienelemente“ und „gleichartige Bedienung“ dominant sind für die Wahrscheinlichkeit, dass eine Fehlbedienung auftritt. Folgt man dieser Überlegung, so können alle 7 Stichproben zusammengefasst werden. Dies führt zu einer Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Fehlbedienung an Schaltpulten von

$$P_{EW} = 1,6 \cdot 10^{-3} \quad (P_{5\%} = 7,9 \cdot 10^{-4}, P_{95\%} = 2,7 \cdot 10^{-3})$$

Dieser Wert ergibt sich aus der Betriebserfahrung. Vorausgesetzt ist, dass die drei vor-
genannten fehlerfördernden Faktoren vorliegen und die ergonomische Gestaltung der
Bedienoberfläche keine zusätzlichen fehlerfördernden Mängel aufweist.

Vergleicht man das aus der Betriebserfahrung abgeleitete Ergebnis mit den in THERP
vorgeschlagenen Daten, so ist Folgendes festzustellen:

- Insgesamt stimmen Betriebserfahrung und die in THERP vorgeschlagenene Daten,
Tabelle 12 (2, 3, 4), sowohl im Erwartungswert als auch in der Breite der Verteilung
gut überein. Dies wird insgesamt als Hinweis für die Validität dieser Daten
gewertet.
- Die Annahme in THERP, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit um bis zu einem
Faktor von 3 zunehmen kann, wenn die Bedienelemente nur durch Beschriftung
gekennzeichnet sind, konnte nicht bestätigt werden. Sie führt zu einer
Fehlerwahrscheinlichkeit, die etwas höher ist, als der Wert aus der Betriebserfah-
rung und ist demnach als pessimistisch einzuschätzen.

- Handlungsregulationsfehler bei Tätigkeiten, die nicht an Leitständen ausgeführt
werden

Die Stichproben S2, S4 und S7 charakterisieren Tätigkeiten vor Ort in der Anlage,
die zum Spektrum der in einer PSA zu untersuchenden Handlung gehören, für die
aber in der Methode THERP keine Daten vorgeschlagen werden. Diese Stichpro-
ben tragen zur Erweiterung des verfügbaren Datenbestandes bei.

- S2, Manuelles Einstellen auf eine vorgegebene, visuell wahrzunehmende
Markierung
Bei der der Stichprobe zugrundeliegenden Tätigkeit muss der Ansprechdruck
eines federbelasteten Sicherheitsventils eingestellt werden. Eine Schraubhülse
ist mit großer Genauigkeit bis zu einer vorgegebenen Marke einzudrehen. Die
Stichprobe weist auf Fehleinstellungswahrscheinlichkeit von $1,6 \cdot 10^{-3}$
(Erwartungswert) hin. Die Handlung und der postulierte Fehler gehören zum
Untersuchungsumfang einer PSA. Das Stichprobenergebnis könnte auch als
Schätzhilfe für ggf. vergleichbare Tätigkeiten verwendet werden (z. B.
Einstellen von Armaturendschaltern).
- S4, Einbringen eines Baugruppensimulationsstiftes und S7, Anschluss von
Kabeln an Baugruppen

Solche Tätigkeiten können Bestandteile von Notfallmaßnahmen oder von noch zu berücksichtigenden Reparaturhandlungen sein. Die Stichproben liefern Schätzwerte für die Wahrscheinlichkeit von möglichen Verwechslungsfehlern (S4, $P_{EW} = 3,1 \cdot 10^{-2}$, S7, $P_{EW} = 9,9 \cdot 10^{-4}$).

- Zeitfehler

Die Stichproben S3, S10 und S14 befassen sich mit Zeitfehlern (zu spät, zu früh oder nicht ausreichend lange) bei Bedienvorgängen an Leitständen. Zu den Fehlerarten „zu spät“ und „zu früh“ werden in THERP keine Daten vorgeschlagen. Bei der Nutzung der entsprechenden Stichprobenergebnisse im Rahmen einer PSA ist insbesondere auf die Vergleichbarkeit der situativen Anforderungen zu achten (z. B. S3, kurze Zeitspanne zwischen Erkennen der Notwendigkeit und der Ausführung der Handlung). In der Methode THERP wird in Tabelle 12, Item 10 ein Wert von $P_{EW} = 3,8 \cdot 10^{-3}$ für den Fehler „Komponentenstellbefehl wird nicht ausreichend lange erteilt“ vorgeschlagen. Dieser Wert ist etwas höher als das Ergebnis der Stichprobe S14, die einen vergleichbaren Handlungsfehler beschreibt. Angesichts der Unsicherheitsbänder beider Werte kann das Stichprobenergebnis dennoch als Hinweis für die Validität des THERP-Wertes eingeschätzt werden.

- Regelungsaufgaben

Die Methode THERP schlägt keine Daten vor zur fehlerhaften Ausführung von Regelungsaufgaben. Stichprobe S15 beschreibt eine Handlungssituation, in der eine Regelabweichung nicht schnell genug reduziert wurde. Das Stichprobenergebnis von $P_{EW} = 5,2 \cdot 10^{-2}$ kennzeichnet die Fehlerwahrscheinlichkeit einer aus ergonomischer Sicht schwierigen Regelaufgabe, die unter der Wirkung einer erhöhten Stressbelastung auszuführen ist.

- Unabsichtliche Bedienung als Folge von anderen Tätigkeiten an oder in der Nähe von Leitständen

Wie in THERP, Seite 13-5, ausgeführt, sind solche Fehler zu unterstellen, wenn keine Schutzmaßnahmen getroffen wurden (u.a. Abdeckung, Freigabetaste). Eine Fehlerwahrscheinlichkeit wird jedoch nicht vorgeschlagen. Stichprobe S12 liefert einen Hinweis für die Wahrscheinlichkeit solcher Fehler ($P_{EW} = 1,2 \cdot 10^{-3}$).

5.1.2 Ausführungsfehler aufgrund von Fehlern bei der Generierung der Aufgabenstellung

Bei in den 8 Stichproben S16 bis S23 aufgetretenen Ausführungsfehlern gingen kognitive Fehler bei der Generierung der Aufgabenstellung voraus. In 7 der Stichproben wurde im Gedächtnis gespeichertes Wissen falsch erinnert. In Stichprobe S21 wurde aufgrund eines Kommunikationsfehlers eine Arbeitsfreigabe fälschlicherweise erteilt. Für die probabilistische Bewertung von Personalhandlungen sind die Stichproben, die sich mit der Fähigkeit befassen, im Gedächtnis gespeichertes Wissen zu nutzen, von besonderem Interesse. Für die Fehlerart „falsch erinnert“ werden in der Methode THERP keine Daten vorgeschlagen. Die aufgetretenen Fehler traten in unterschiedlichen Handlungssituationen auf (z. B. Lage von Handlungsobjekten falsch erinnert oder Teilschritt einer Aufgabe falsch erinnert). Im Rahmen einer probabilistischen Analyse von Personalhandlungen sind solche Fehler in Betracht zu ziehen, wenn

- Informationen zunächst gemerkt werden müssen, ehe sie in Handlungen umgesetzt werden,
- nicht ausreichend detaillierte Prozeduren zur Verfügung stehen und die Informationslücken in den Unterlagen durch erinnertes Wissen zu schließen sind,
- keine schriftlichen Unterlagen verwendet werden und der Handelnde entsprechend seinem Fachwissen vorgeht.

Charakteristisch für diese Stichproben ist, dass die fehlerhaft ausgeführte Tätigkeit Ähnlichkeiten zur erforderlichen Tätigkeit aufweist (z. B. Lage, visuelle Erscheinung, Art der Betätigung der Handlungsobjekte). Diese Randbedingung sollte beachtet werden, wenn die Stichprobenergebnisse im Rahmen einer probabilistischen Analyse genutzt werden. In Abhängigkeit von der Häufigkeit, mit der eine Handlung ausgeführt wird und zusätzlicher ergonomischer Gestaltungsmängel, die sich fehlerfördernd auswirken, variieren die Erwartungswerte der Fehlerwahrscheinlichkeiten von $1,7 \cdot 10^{-3}$ (häufige Tätigkeit) über 2 bis $4 \cdot 10^{-2}$ (selten ausgeführte Tätigkeit, z. B. einmal jährlich) bis hin zu Werten deutlich höher als $1 \cdot 10^{-1}$ (sehr wenig Erfahrung und zusätzliche ergonomische Gestaltungsmängel). Führt man die Stichproben entsprechend diesem Zuordnungsprinzip zusammen, so ergeben sich als generische Fehlerwahrscheinlichkeiten für die Fehlerart „Aufgabenstellung falsch erinnert“ unter der Randbedingung „Ähnlichkeit zwischen erforderlicher und fehlerhaft ausgeführter Handlung“:

- Häufig ausgeführte Handlung, keine zusätzlichen fehlerfördernden Faktoren (vgl. S19)
 $P_{EW} = 1,7 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 2 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 4,4 \cdot 10^{-3}$)
- Selten (z. B. 1 x jährlich) ausgeführte Handlung, keine zusätzlichen fehlerfördernden Faktoren (S16, S17, S18, S23)
 $P_{EW} = 2,1 \cdot 10^{-2}$ ($P_{5\%} = 8 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 4 \cdot 10^{-2}$)
- Selten ausgeführte Handlung, weitere fehlerfördernde Faktoren (S20, S22)
 $P_{EW} = 1,5 \cdot 10^{-1}$ ($P_{5\%} = 5 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 2,3 \cdot 10^{-1}$)

Diese generischen Werte können als Schätzwerte für in PSA Studien zu bewertende vergleichbare Handlungsfehler herangezogen werden. Wie aus den Stichproben S16, S17 und S20 hervorgeht, können sich Fehler bei der Generierung der Aufgabenstellung negativ auf eine Reihe gleichartiger, hintereinander auszuführender Handlungen auswirken.

Dies ist als Hinweis auf eine vollständige Abhängigkeit zwischen den Fehlerwahrscheinlichkeiten der vergleichbaren Handlungen zu werten, wenn die Aufgabenstellung falsch erinnert wurde.

5.1.3 Auslassungsfehler, Aufgabenstellung nicht erinnert

Die 6 Stichproben S27, S28, S30, S31, S34 und S35 beschreiben Handlungssituationen, in denen gedächtnisgestützt vorgegangen und dabei eine Teilaufgabe ausgelassen wurde. Diese Stichproben geben Hinweise darauf, mit welcher Wahrscheinlichkeit Gedächtnisinhalte unter unterschiedlichen situativen Randbedingungen nicht erinnert werden. In Abhängigkeit von den situativen Randbedingungen „Häufigkeit der Handlung“, „Stressbelastung“ und „zusätzliche fehlerfördernde Faktoren“ liegen die Stichprobenresultate in einem Wertebereich von $1 \cdot 10^{-3}$ (häufige Handlung) bis $1,9 \cdot 10^{-1}$ (wenig Erfahrung, sehr hoher Stress, Gestaltungsdefizite). Entsprechend dieser Merkmale können die 6 Stichproben wie folgt gruppiert werden:

- Viel Erfahrung, keine weiteren Defizite (S30)
 $P_{EW} = 1 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 1,2 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 2,7 \cdot 10^{-3}$)
- Wenig Erfahrung, keine weiteren Defizite (S35)
 $P_{EW} = 3 \cdot 10^{-2}$ ($P_{5\%} = 3,7 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 7,9 \cdot 10^{-2}$)

- Wenig Erfahrung, erhöhter Stress (S27 + S34)
 $P_{EW} = 3,5 \cdot 10^{-2}$ ($P_{5\%} = 8,2 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 7,6 \cdot 10^{-2}$)
- Wenig Erfahrung, erhöhter Stress, ergonomische Mängel (S31)
 $P_{EW} = 5,2 \cdot 10^{-2}$ ($P_{5\%} = 6,3 \cdot 10^{-3}$, $P_{95\%} = 1,3 \cdot 10^{-1}$)
- Wenig Erfahrung, erhöhter Stress, ergonomische Mängel, dynamische Handlungssituation (S28)
 $P_{EW} = 1,9 \cdot 10^{-1}$ ($P_{5\%} = 2,6 \cdot 10^{-2}$, $P_{95\%} = 4,4 \cdot 10^{-1}$)

Diese Ergebnisse können als Schätzwerte zur Bewertung von Handlungssituationen verwendet werden, in denen vergleichbare Fehler unter vergleichbaren Randbedingungen postuliert werden. In der Methode THERP wird in Tabelle 7, Item 5 und 5# ein Wertebereich von $P_{EW} = 1,6$ bis $8 \cdot 10^{-2}$ für das Auslassen eines Handlungsschrittes vorgeschlagen, wenn dieser in einer anzuwendenden Prozedur beschrieben ist, diese aber nicht verwendet wird. In einem solchen Fall geht der Operateur gedächtnisgestützt vor. Leitet man aus der Erfordernis, die Prozedur zu verwenden, den Schluss ab, dass zu wenig Erfahrung vorliegt um auf gedächtnisgestütztes Vorgehen zu vertrauen, so können diese Werte am ehesten mit dem Ergebnis der Stichprobe S35 verglichen werden ($P_{EW} = 3 \cdot 10^{-2}$). Dies wäre dann ein Hinweis für die Validität des durch THERP Tabelle 7, Item 5 und 5# festgelegten Wertebereichs.

Unter den Stichproben sind Handlungssituationen, die bis auf die Höhe der Stressbelastung vergleichbar sind. Daraus lassen sich Hinweise zur Validität des THERP-Stressmodells (Tabelle 16) ableiten. So können die Stichproben S35 (kein Stress) und S27, S34 (erhöhter Stress) sowie S31 (erhöhter Stress, ergonomische Mängel) und S28 (erhöhter Stress, ergonomische Mängel, dynamische Handlungssituation) gegenübergestellt werden. Demnacherhöht moderat ansteigender Stress die Fehlerwahrscheinlichkeit um den Faktor 1,2. Die aus einer dynamischen Handlungssituation resultierender Belastungen führen zu einer weiteren Erhöhung um den Faktor 3,7.

In THERP, Tabelle 16 wird für die Wirkung von moderat erhöhtem Stress ein Faktor von 2 (Item 4a) und für die Zusatzwirkung einer dynamischen Handlungssituation ein weiterer Faktor von 2,5 (Unterschied Item 4a und 5a) vorgeschlagen. Die Einschätzung „Faktor 2“ liegt über dem aus der Betriebserfahrung abgeleiteten Wert (Faktor 1,2), die Einschätzung „Faktor 2,5“ unter dem Betriebserfahrungswert (Faktor 3,7). Angesichts der noch wenigen aus der Betriebserfahrung vorliegenden Daten zum Einfluss von Stress und den damit verbundenen Unsicherheiten (vgl. auch Stichprobenanalysen in

Abschnitt 5.1.4) sind die Abweichungen nicht so relevant, dass hier auf Korrekturbedarf im THERP Stressmodell geschlossen werden kann.

5.1.4 Auslassungsfehler, schriftliche Anweisung nicht gelesen

Fehler beim Lesen und Verstehen von Unterlagen können dazu führen, dass in den Unterlagen vorgegebene Teilhandlungen nicht ausgeführt werden. Diese Fehlerart ist in den Stichproben S29, S32, S33 und S37 aufgetreten. In dem der Stichprobe S37 zugrundeliegenden Ereignis hat der Operateur die Anweisung gelesen, sie aber aufgrund von Mängeln bei der Formulierung falsch interpretiert und damit eine erforderliche Teilhandlung ausgelassen. Für diesen Fehlermechanismus werden in der Methode THERP keine Daten vorgeschlagen.

Bei den drei Stichproben S29, S32 und S33 wurde die Anweisung nicht gelesen. In Abhängigkeit von den situativen Randbedingungen (Stresseinfluss) und der ergonomischen Gestaltung der Unterlage variieren die Stichprobenergebnisse zwischen $P_{EW} = 3,4 \cdot 10^{-3}$ und $P_{EW} = 1,4 \cdot 10^{-2}$. Die Stichproben S29 und S33 weisen vergleichbare Randbedingungen auf (kein erhöhter Stress, umfangreiche Arbeitsunterlage, Möglichkeit abgearbeitete Anweisungen zu kennzeichnen) und können somit zusammengefasst werden. Das Ergebnis von $P_{EW} = 3,8 \cdot 10^{-3}$ ($P_{5\%} = 8,8 \cdot 10^{-4}$, $P_{95\%} = 8,5 \cdot 10^{-3}$) stimmt sehr gut mit dem in der Methode THERP vorgeschlagenen, für diese Handlungssituation passenden Wert von $P_{EW} = 3,7 \cdot 10^{-3}$ überein (Tabelle 7, Item 2). Dies ist als Hinweis für die Validität der in THERP vorgeschlagenen Fehlerwahrscheinlichkeit zu werten.

Der aus den Stichproben S29 und S33 gebildete Wert kann dem Ergebnis der Stichprobe S32 gegenübergestellt werden, bei der unter sonst vergleichbaren Randbedingungen moderat erhöhter Stress vorlag und somit ein Hinweis auf Wirkung des Einflusses von moderat erhöhtem Stress ableitbar ist. Der Vergleich zeigt eine Zunahme der Fehlerwahrscheinlichkeit um den Faktor 3,8. Dieses Resultat ist dem in der Methode THERP vorgeschlagenen Wertebereich für die Wirkung von moderat erhöhtem Stress von Faktor 2 bis Faktor 4 (Tabelle 16, Item 4a, 4b) gegenüberzustellen. Der Betriebserfahrungswert befindet sich noch innerhalb des in THERP vorgeschlagenen Wertebereichs. Dies wird als Hinweis für die Validität der Einschätzung von THERP zur Wirkung von moderat erhöhtem Stress interpretiert.

5.2 Vorschläge zur Fortschreibung des Methodenbandes des PSA-Leitfadens

Ausgehend von den Erkenntnissen zu Zuverlässigkeitskenngrößen für Personalhandlungen, die auf der zugänglichen Betriebserfahrung deutscher Kernkraftwerke beruhen, können Empfehlungen abgeleitet werden, die zur Weiterentwicklung der im Methodenband des PSA-Leitfadens vorgeschlagenen Bewertungsmethoden für Personalhandlungen beitragen. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeiteten Empfehlungen werden im Folgenden dargestellt.

- Methode von Bayes zur Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen für Personalhandlungen

Die Methode von Bayes wird bereits bei der Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen für Komponenten eingesetzt. Sie liefert auf der Grundlage von akzeptierten mathematischen Vorgehensweisen Schätzwerte für Zuverlässigkeitskenngrößen, auch wenn die verfügbaren Stichproben aus der Betriebserfahrung nur eine geringe Zahl beobachteter Fehler enthalten. Die wesentliche Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist die Vergleichbarkeit der zu einer Stichprobe zusammengefassten Elemente. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Personalhandlungen ist es erforderlich, dass

- die Handlungen,
- die Fehlerart,
- die wesentlichen leistungsbeeinflussenden Randbedingungen

aus ergonomischer Sicht vergleichbar sind. Auch sind die Zahl der Fehler und die Zahl der Gelegenheiten für einen Fehler hinreichend genau zu ermitteln. Die Anwendung dieser Methode auf den Datenbestand „meldepflichtige Ereignisse in deutschen Kernkraftwerken“ hat gezeigt, dass Stichproben, die diese Qualitätsanforderungen erfüllen, bestimmt werden können. Grundsätzlich ist es denkbar, dass auch Stichproben aus dem einem Kraftwerksbetreiber zugänglichen Datenbestand zu Ereignissen unterhalb der Meldeschwelle ableitbar sind. Die zurzeit gültige Fassung des Methodenbandes lässt die Verwendung von aus der Betriebserfahrung abgeleiteten Fehlerwahrscheinlichkeiten zu. Es wird daher empfohlen, auf die Anwendung der Bayes'schen Methode auf Stichproben zur Zuverlässigkeit von Personalhandlungen, die die o.g. Qualitätsanforderungen erfüllen, im Methodenband des PSA-Leitfadens, hinzuweisen. Um die erforderlichen Werkzeuge zur

Anwendung der Bayes'schen Methode in der Stufe 2, d.h. anlagenspezifische Bewertung unter Nutzung von Vorerfahrung aus anderen Anlagen, zu vervollständigen, sollte noch ein Rechenprogramm zum Einsatz des sogenannten Superpopulationsansatzes für Fehlerwahrscheinlichkeiten bereitgestellt werden.

- Verifikation des empfohlenen Datenbestandes

Wie im Abschnitt 5.1 dargestellt, konnten mit den aus der Betriebserfahrung abgeleiteten Daten Hinweise für die Validität einer Reihe von Daten der empfohlenen Methode THERP aufgezeigt werden. Im Einzelnen betrifft dies Daten aus der Tabelle 12 (Item 2, 3,4 und 10), Tabelle 7 (Item 2, 5 und 5#) und Tabelle 16 (Item 4a, 4b). Hinweise darauf, dass der Datenbestand der Methode THERP signifikante Unterschiede zu den Daten aus der Betriebserfahrung aufweist, konnten bisher nicht gefunden werden. Die bisher vorliegende Verifikationserfahrung rechtfertigt die im PSA-Methodenband grundsätzlich ausgesprochene Empfehlung für den THERP Datenbestand.

- Erweiterung des Datenbestandes

Die Betriebserfahrung weist auf die Relevanz von Handlungen und Fehlerursachen hin, für die in der Methode THERP keine Daten vorgeschlagen werden. In dieser Hinsicht ist die Methode THERP als nicht ausreichend vollständig zu bezeichnen. Die neuen Handlungstypen, Fehlerarten und Daten können die Methode ergänzen, ohne dass hierdurch fachspezifische Konflikte, die grundsätzliche Modifikationen der gesamten Bewertungsmethode erfordern, entstehen. Die neuen Daten tragen zur Bewertung vergleichbarer Handlungsfehler bei, lassen sich aber auch als Schätzhilfe zur Bewertung ähnlicher Handlungsfehler nutzen. Ihre Verwendung sollte im Rahmen einer Fortschreibung der Bewertungsmethoden empfohlen werden. Im einzelnen handelt es sich hierbei um folgende Daten:

- Manuell vor Ort durchzuführender Einstellvorgang auf eine visuell wahrzunehmende Markierung, hohe Genauigkeit erforderlich, Fehlerart „falsch eingestellt“.

$$P_{EW} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ (vgl. S2)}$$

- Einbringen von Simulationsstiften in elektronische Baugruppen vor Ort, Fehlerart „in falsche Baugruppe eingebracht“, Faktoren „Greifraum“, visuelle Wahrnehmung“, „Tätigkeit“ begünstigen den Fehler.

$$P_{EW} = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ (vgl. S4)}$$

- Anschluss von Kabeln an Baugruppenbuchsen vor Ort, Fehlerart „an falsche Baugruppe angeschlossen“, Faktoren „Greifraum“, „visuelle Wahrnehmung“, „Tätigkeit“ begünstigen den Fehler.

$$P_{EW} = 9,9 \cdot 10^{-4} \text{ (vgl. S7)}$$

- Zeitfehler bei Bedienvorgängen an Steuerpulten, Fehlerart „zu spät bedient“, kurze Zeitspanne zwischen Erkennen der Notwendigkeit und Ausführung

$$P_{EW} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ (vgl. S3)}$$

- Zeitfehler bei Bedienvorgängen an Steuerpulten, Fehlerart „zu früh bedient“, erhöhter Stress, Bedienfolge, kurze Mindestwartezeit.

$$P_{EW} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ (vgl. S10)}$$

- Diskontinuierliche Regelaufgabe, Fehlerart „Regelabweichung nicht schnell genug reduziert“, erhöhter Stress, schnelle Reaktion erforderlich

$$P_{EW} = 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ (vgl. S15)}$$

- Versehentliche Bedienung im Zusammenhang mit anderen Tätigkeiten an oder in der Nähe von Steuerpulten, keine Schutzmaßnahme gegen Fehlbedienung.

$$P_{EW} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ (vgl. S12)}$$

- Ausführungsfehler aufgrund kognitiver Fehler bei der Generierung der Aufgabenstellung

$$P_{EW} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ (optimale Faktoren vgl. S19)}$$

$$P_{EW} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ (wenig Erfahrung, vgl. S16, 17,18, 23)}$$

$$P_{EW} = 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ (wenig Erfahrung, weitere ergonomische Mängel, vgl. S20, 22)}$$

- Auslassungsfehler, Aufgabenstellung nicht erinnert

$$P_{EW} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ (optimale Faktoren, vgl. S30)}$$

$$P_{EW} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ (wenig Erfahrung, vgl. S35)}$$

$$P_{EW} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ (wenig Erfahrung, erhöhter Stress, vgl. S27, 34)}$$

$$P_{EW} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ (wenig Erfahrung, erhöhter Stress, ergonomische Mängel, vgl. S31)}$$

$P_{EW} = 1,9 \cdot 10^{-1}$ (wenig Erfahrung, ergonomische Mängel, dynamische Handlungssituation, vgl. S28)

- Auslassungsfehler, schriftliche Information gelesen aber falsch interpretiert, missverständlich formulierte Anweisung, erhöhter Stress

$P_{EW} = 3,6 \cdot 10^{-2}$ (vgl. S37)

5.3 Vorschläge zur Überprüfung der Methode HCR/ORE

Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, wurden in der deutschen Betriebserfahrung zu meldepflichtigen Ereignissen keine Stichproben gefunden, mit denen sich das HCR/ORE Bewertungsverfahren verifizieren lässt. In diesem Abschnitt soll daher dargestellt werden, welche Informationen zu HCR/ORE vorliegen sollten, um die Tragfähigkeit dieser Methode zu überprüfen.

Die Methode HCR/ORE (Human Cognitive Reliability Operator Reliability Experiments) wurde in der Fachzeitschrift „Reliability Engineering and System Safety“ 1994 publiziert (/MOI 94/, Seiten 27 bis 55). Eine zusammenfassende Darstellung dieser Methode findet sich auch in einer Veröffentlichung der OECD-Nuclear Energy Agency aus dem Jahr 1998 (Critical Operator Actions-Human Reliability Modeling and Data Issues, /NEA 98/, Seite 210 ff). Die Methode bewertet

- die Wahrscheinlichkeit von Fehldiagnosen (z. B. aufgrund von Fehlern bei der Auswertung einer Entscheidungslogik in einer Prozedur),
- die Wahrscheinlichkeit, dass erforderliche Maßnahmen nicht rechtzeitig eingeleitet werden (z. B. keine erfolgreiche Diagnose in einem vorgegebenen Zeitfenster),
- die Wahrscheinlichkeit, dass die erforderlichen Handlungen selbst fehlerhaft ausgeführt werden.

Die Bewertung der Wahrscheinlichkeit von Fehldiagnosen beruht im Kern auf einer Expertenschätzung. Zur Bewertung der Wahrscheinlichkeit, dass die Diagnose und Entscheidungsphase nicht rechtzeitig erfolgreich abgeschlossen werden, stehen zeitabhängig Funktionen zur Verfügung. Es wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Verhältnis aus im Mittel benötigter und maximal verfügbarer Zeit und der Fehlerwahrscheinlichkeit postuliert. Eine Reihe weiterer Parameter (u.a. Charakteristi-

ka des Alarmierungsverlaufs, Anlagentyp) sind zu bestimmen, um das Ergebnis zu ermitteln.

Entsprechend /MOI 94/ wurden der funktionale Zusammenhang sowie die Parameterwerte aus den Ergebnissen von über 1000 Simulatorexperimenten, die in USA durchgeführt wurden, abgeleitet. Diese qualitative Datenbasis, die Vorgehensweisen und wissenschaftliche Begründung ihrer Weiterverarbeitung und die genauen Parameterwerte sind Eigentum der Methodenentwickler und wurden nicht veröffentlicht.

Fehlerwahrscheinlichkeiten für die Handlungen nach erfolgreicher Diagnose sollen mit der Methode THERP ermittelt oder durch Expertenurteil bestimmt werden.

Die Methode HCR/ORE weist eine Reihe von Merkmalen auf, die einer wissenschaftlichen Diskussion bedürfen, bevor auf die von den Methodenentwicklern propagierte Validität dieser Methode geschlossen werden kann. U.a. wären folgende Merkmale zu diskutieren.

- Übertragbarkeit der Simulatorexperimente.
Eine Simulatorumgebung ist eine künstliche Welt. Aus ergonomischer Sicht können wesentliche in einer Störfallsituation wirksamen leistungsbeeinflussenden Faktoren (u.a. Stress durch die emotionale Beanspruchung) nur bedingt simuliert werden.
- Interpretation und Weiterverarbeitung der Simulatordaten.
- Problematik der Verwendung von Zeitverhältnissen im Algorithmus.
- Randbedingungen bei der Durchführung von Expertenschätzungen.
- Wissenschaftlicher Hintergrund und Absicherung bei der Bewertung der Wahrscheinlichkeit von Fehlentscheidungen.

Um die Tragfähigkeit der Methode HCR/ORE zu überprüfen, sollten einem Reviewteam Informationen vorliegen

- zur Simulatordatenbasis (u.a. Randbedingungen, Szenarien, Ergebnisse),
- zur methodischen Weiterverarbeitung und Übertragung dieser Daten in den HCR/ORE Ansatz,

- zu Kommentaren von Experten und Nutzern, die unabhängig sind von der Organisation der Methodenentwickler,
- zu den Grundlagen, die die vorgeschlagene Bewertung von Fehldiagnosen und sogenannte Recovery Handlungen rechtfertigen,
- zu den Parametern der Zeit/Wahrscheinlichkeitskorrelationen, um ggf. auch Ergebnisse dieser Methode mit Ergebnissen anderer Methoden vergleichen und diskutieren zu können.

5.4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Zuverlässigkeitskenngrößen für Personalhandlungen, deren Verwendung im Methodenband zum PSA-Leitfaden empfohlen wird, verifiziert und der verfügbare Datenbestand insgesamt erweitert. Die Arbeitsergebnisse führten zu neuen Erkenntnissen und zu Vorschlägen für eine Fortschreibung der empfohlenen Methoden zur probabilistischen Bewertung von Personalhandlungen.

Als Informationsquelle standen die in deutschen Kernkraftwerken aufgetretenen meldepflichtigen Ereignisse zur Verfügung. Systematisch ausgewertet wurden die Meldeberichte, Stellungnahmen von Sachverständigen, technische Unterlagen und Erkenntnisse aus Gesprächen mit sachkundigem Personal der Anlagenbetreiber. Die Auswertung führte zu insgesamt 37 Stichproben zu Personalhandlungen mit aufgetretenen Fehlern. Daraus konnten mit der Bayes'schen Methode probabilistische Kenngrößen für Personalfehlhandlungen berechnet werden. Diese Kenngrößen bilden die erste auf der Betriebserfahrung in deutschen Kernkraftwerken beruhende probabilistische Datenbasis auf diesem Arbeitsfeld.

Die Anwendung der Bayes'schen Methode wird im Methodenband des PSA-Leitfadens empfohlen. Sie liefert probabilistische Schätzwerte ausgehend von Stichproben aus der Betriebserfahrung. Die Qualitätsanforderungen an diese Stichproben sind hoch. Die Erfahrung dieses Forschungsvorhabens ist, dass auch auf dem Gebiet der Personalhandlungszuverlässigkeit Stichproben erarbeitet werden können, die diesen Anforderungen genügen.

Die erforderlichen Recherchen sind teilweise sehr arbeitsaufwändig, so dass im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht alle der insgesamt 126 potentiell bewertbaren

Ereignisse abschließend untersucht werden konnten. Wie in Abbildung 5-2 dargestellt, könnte die verfügbare Datenbasis noch erheblich ausgeweitet werden. Die Bearbeitung von 32 Ereignissen ist weitgehend abgeschlossen und 49 weitere Ereignisse könnten noch ausgewertet werden. Hinzuzurechnen sind noch die auswertbaren Ereignisse, die nach dem Stichtag dieses Forschungsvorhabens (Ende 12/2006) aufgetreten sind. Eine Erfahrung dieses Vorhabens ist, dass bei einer genauen Untersuchung nur etwa 20% der potentiell bewertbaren Ereignisse sich als doch nicht nutzbar herausstellen (vgl. Abb. 5-2, 37 bewertete Stichproben bei insgesamt 45 abschließend untersuchten Ereignissen).

Aus der Fortführung und dem Abschluss der Auswertung der Datenbasis „Meldepflichtige Ereignisse in Deutschland“ ist noch ein erheblicher Erkenntnisgewinn für das Fachgebiet „probabilistische Bewertung von Personalhandlungen“ zu erwarten. Dieser könnte noch erweitert werden, wenn die Betriebserfahrung zu sicherheitsrelevanten Personalhandlungen, die im Fehlerfall zu einem meldepflichtigen Ereignis führen, aber bis jetzt noch nicht auffällig geworden sind, als Informationsquelle genutzt wird (vgl. Abb. 5-2). Mit der pessimistischen Annahme eines Fehlers könnten Stichproben, die mit dem Bayes'schen Verfahren bewertbar sind, erarbeitet werden. Hierdurch würde methodisches Neuland beschritten. Diese neue Datenquelle könnte einerseits als Vorinformation für vergleichbare, bereits bewertete Handlungen genutzt werden. Andererseits liefert sie pessimistische Abschätzungen zu noch nicht bewertbaren Handlungs- und Fehlertypen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Fortschritte bei probabilistischer Bewertung von Personalhandlungen erzielt wurden. Gleichwohl zeigte sich, dass hierdurch nicht alle Probleme auf dem Fachgebiet gelöst werden können. Insbesondere bei der probabilistischen Bewertung von Diagnosehandlungen wird man nach wie vor auf Ergebnisse von Simulationsstudien und Expertenschätzungen zurückgreifen müssen. Jedoch kann die Qualität vieler derzeit verfügbarer Bewertungsmethoden, d.h. nicht nur die im Methodenband empfohlenen, an Hand des vorliegenden Datenbestandes aus der deutschen Betriebserfahrung überprüft werden.

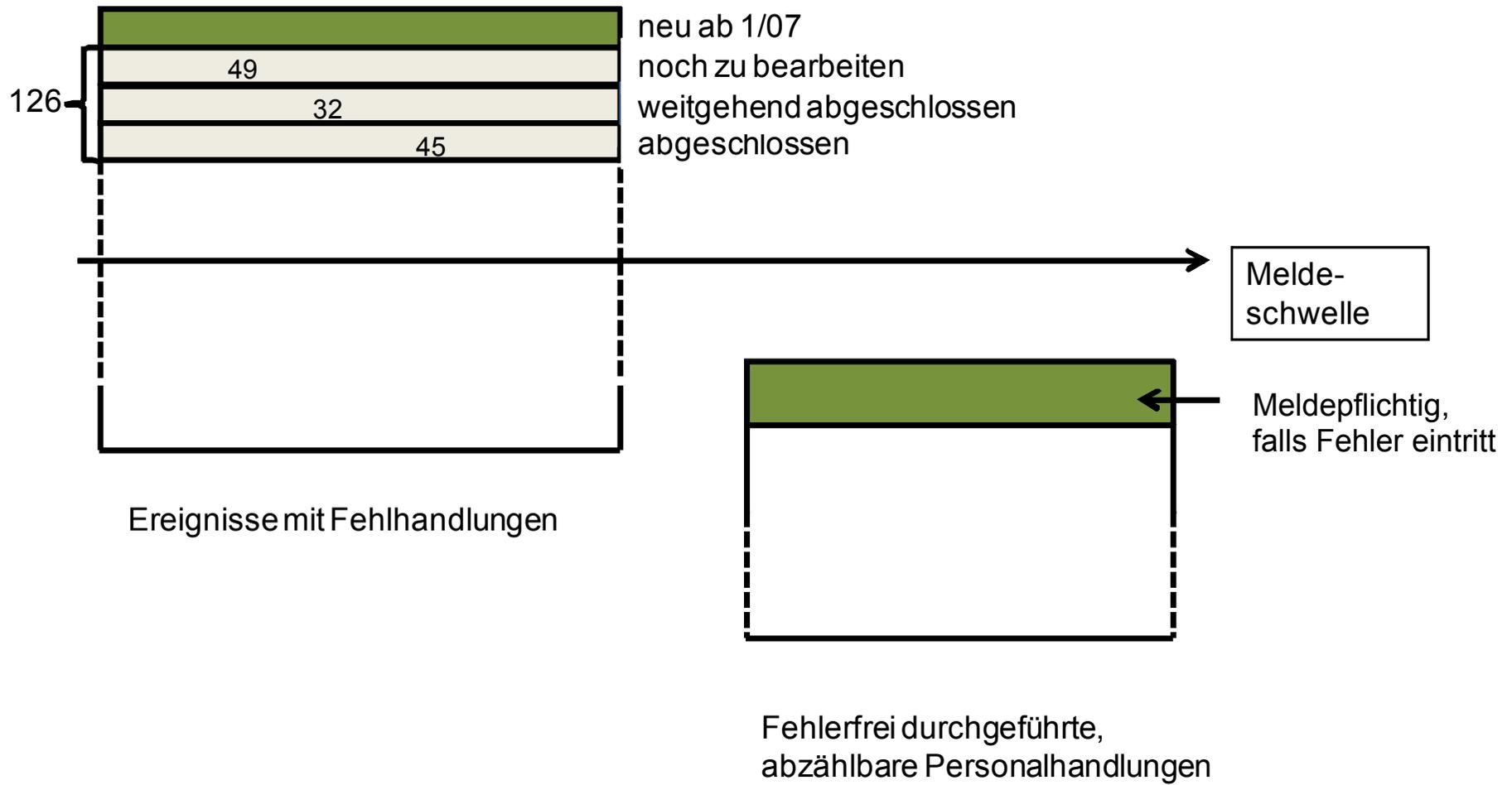


Abb. 5-2

Erreichter Stand und Ausblick

6 Literatur

- /BOX 73/ Box, G.E.P. and Tiao, G.C.
Bayesian Inference in Statistical Analysis
Reading MA: Addison-Wesley, 1973
- /GRS 96/ Hauptmanns, U, et.al.
Weiterentwicklung von methodischen Grundlagen und Rechenprogrammen
für probabilistische Sicherheitsanalysen,
GRS-A-2347, Mai 1996
- /GRS 01/ GRS
Menschliche Zuverlässigkeit in der probabilistischen Sicherheitsanalyse
(PSA), Teil 2: Methoden zur Verifikation von Swain-Daten und zur Daten-
verbreiterung,
GRS-A-2951, Februar 2001
- /GRS 06/ GRS
Erprobung und Bewertung der Methoden einer PSA für SWR-Anlagen der
Baulinie 69 nach Stand von Wissenschaft und Technik (PSA SWR 69),
Fachband 2 – Datenermittlung für die PSA der Stufe 1 aus dem Leistungs-
betrieb,
GRS-A-3293, Juni 2006
- /IRSN 07/ IRSN Report „Principles of PANAME HRA Method“,
IRSN IST3C/BACR, May 2007
- /LaSalle 87/Recovery Actions in PRA for the Risk Methods Integration and Evaluation
Program (RMIEP)
U.S. Nuclear Regulatory Commission,
NUREG/CR-4834, June 87
- /MET 05/ Facharbeitskreis probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke:
Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke,
BfS-SCHR-37/05, Stand August 2005

- /MOI 94/ Moieni, P., Spurgin, A.I., Singh, A.
Advances in human reliability analysis, Part 1: Framework, models and data, Part 2 “: PC-based-HRA software,
Reliability Engineering and System Safety, Vol. 44, 1994, pgs. 27-66
- /NEA 98/ NEA/CSNI report „Critical Operator Actions-Human Reliability Modeling and Data Issues“,
NEA/CSNI/R(98)1, February 1998
- /SWA 83/ Swain, A.D., Guttman, H.E.
Handbook on Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications,
Final Report, NUREG/CR-1278, SAND 80-0200 RX, AN, Albuquerque, 1983
- /SWA 87/ Swain, A.D.
Accident Sequence Evaluation Program – Human Reliability Analysis Procedure,
NUREG/CR-4772, February 1987

Verteiler für GRS-A-3515

BMU

Ludwig, Oliver 2 x
RS I7 1 x

BfS

Prof. Dr. Berg, Heinz Peter 2 x
Dr. Seidel, Freddy 2 x
AG - F 1 x
AG - F3 1 x

VGB Power Tech e.V. 1 x

Verband der TÜV e.V.

Staudt, Hermann 1 x

Ländergenehmigungs- und Aufsichtsbehörden 5 x

Baden-Württemberg, Bayern, Hessen,
Niedersachsen, Schleswig-Holstein

ENSI

Frischknecht, Albert 2 x

EnBW

Schwarz, Wolfgang 2 x

Paul-Scherrer-Institut

Dr. Dang, Vinh 1 x

E.ON Kernkraft GmbH & Co. OHG Kernkraftwerk Brokdorf

Hanisch, Thomas 2 x

Vattenfall, Hamburg

Dr. Schubert, Bernd 2 x

VDI-Arbeitskreis Menschliche Zuverlässigkeit

Vorsitzender: Prof. Dr. Sträter, Oliver 2 x

TÜV

5 x

TÜV Nord En Sys, TÜV Süd Mannheim,
TÜV Rheinland, TÜV Süd Filderstadt,
TÜV Süd München

GRS

Geschäftsführung (hah, stj) => Pdf-file
Bereichsleiter (erv, lim, paa, prg, rot, zir) => Pdf-file
TECDO => Pdf-file

Abteilung 6030 (poi, bro, fas, har, prw, wib)

6 x

Bibliothek Köln

1 x

Gesamtauflage:**39 Exemplare**

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

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

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

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

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

www.grs.de