

**Vertiefte Untersuchungen
von Betriebserfahrungen
aus Kernreaktoren**

**Jahresbericht 2024 - 2025
(April 2024 – März 2025)**

Vertiefte Untersuchungen von Betriebserfahrungen aus Kernreaktoren

Jahresbericht 2024 - 2025
(April 2024 – März 2025)

Zusammengestellt von

Marc Foldenauer
Vasily Fedorov
Michael Homann
Herve Mbonjo
Jan Stiller

April 2025

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4724R01311 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Betriebserfahrung, Forschungsreaktoren, Kernkraftwerke, meldepflichtige Ereignisse, Übertragbarkeit

Kurzfassung

Die kontinuierliche Auswertung von Ereignissen in den Kernkraftwerken des In- und Auslands im Auftrag des BMUV gehört zu den zentralen Aufgaben der GRS. Die GRS wertet die meldepflichtigen Ereignisse aus deutschen Anlagen sowie sicherheitstechnisch bedeutsame Ereignisse aus ausländischen Kernkraftwerken aus. Ziel ist die Gewinnung von wissenschaftlichen Erkenntnissen und Informationen zur Erweiterung der Wissensbasis der GRS. Das Lernen aus der Betriebserfahrung ist ein wichtiger Bestandteil zum Erhalt und zur Verbesserung des Sicherheitsniveaus von Kernkraftwerken. Die Erkenntnisse, die aus diesen vertieften Auswertungen gewonnen werden, bilden die wissenschaftliche Grundlage für Stellungnahmen, Weiterleitungsnachrichten oder generische Berichte im Auftrag des BMUV.

Der Bericht führt wesentliche Ergebnisse ereignis- bzw. anlagenübergreifender vertiefter Untersuchungen aus dem Berichtszeitraum zu sicherheitsrelevanten Aspekten auf, die im Rahmen des ingenieurtechnischen Screenings von Quellen der Betriebserfahrung erkannt wurden.

Auch die Ergebnisse der Precursor-Analysen und der generischen Auswertung von Rückflüssen zu Weiterleitungsnachrichten werden dargestellt.

Darüber hinaus werden die Ergebnisse zusätzlicher weiterführender Arbeiten im Zusammenhang mit der Auswertung von Betriebserfahrung zusammengefasst, die der Ermittlung und Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik dienen.

Abstract

A central task of GRS is the continuous evaluation of events in nuclear power plants in Germany and abroad on behalf of the BMUV. GRS evaluates all reportable events from German plants as well as safety-relevant events in foreign nuclear power plants. It aims for the extraction of scientific insights and information to extend the knowledge base of GRS. Learning from operating experience is an important element for preserving and improving the safety level of nuclear power plants. Insights obtained from these in-depth evaluations form the scientific basis for expert statements, information notices or generic reports on behalf of the BMUV.

This report presents major results of generic in-depth investigations on safety-relevant aspects detected during the screening of operating experience from all available sources in the reporting period.

Also, the results of precursor analyses and the generic evaluation of the feedback on information notices are described.

Moreover, the results of additional works to determine and advance the state of the art in science and technology related to the evaluation of operating experience are summarized.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
	Abstract.....	III
1	Einleitung	1
2	Vorgehensweise zur Auswertung von Erfahrungen.....	3
2.1	Hintergrund.....	3
2.2	Ziele.....	5
2.3	Informationsfluss und Quellen.....	5
2.4	Vorgehen.....	7
3	Ergebnisse der kontinuierlichen Auswertung von Betriebserfahrung.....	11
3.1	Elektro- und Leittechnik	11
3.1.1	„Defekt von Zenerdioden in Leittechniksschränken“	11
3.2	Mensch – Technik – Organisation.....	13
3.2.1	„Geringfügige Leckage an der Wandauskleidung des Abstellbeckens“	13
4	Ergebnisse der Precursor-Analysen	17
4.1	Einleitung.....	17
4.2	Vorauswahl von Ereignissen.....	18
4.3	Ergebnisse der probabilistischen Bewertungen	21
4.4	Probabilistisch nicht bewertete Ereignisse	26
4.5	Untersuchungen hinsichtlich der Weiterentwicklung von Methoden für die Precursor-Analyse	26
5	Ergebnisse der generischen Auswertung von Rückflüssen zu Weiterleitungsnachrichten	29
6	Ergebnisse zusätzlicher weiterführender Arbeiten	31

6.1	Festlegung des Prüfumfangs bei Verdacht auf systematische Schadensursache	31
7	Zusammenfassung	37
	Literaturverzeichnis.....	39
	Abbildungsverzeichnis.....	41
	Tabellenverzeichnis.....	43

1 Einleitung

Die Erfahrung aus dem Betrieb und der Stilllegung von Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren und anderen kerntechnischen Anlagen ist unverzichtbar für die Aufrechterhaltung eines hohen kerntechnischen Sicherheitsniveaus von Kernreaktoren in der Bundesrepublik Deutschland und Grundlage für zahlreiche internationale Beiträge zur deutschen Betriebserfahrung. Die sorgfältige und intensive wissenschaftliche Untersuchung aufgetretener Ereignisse in den Kernreaktoren des In- und Auslands, unter Einbeziehung der sonstigen sicherheitsrelevanten Erkenntnisse aus dem Anlagenbetrieb und der Stilllegung, bildet eine der wichtigsten technischen Grundlagen für einen Erfahrungsrückfluss. Die innerhalb des Vorhabens 4724R01311 „Vertiefte wissenschaftliche Untersuchungen von Erfahrungen aus Kernreaktoren“ durchgeführten Arbeiten dienen der Beantwortung von grundlegenden wissenschaftlichen Fragestellungen, der zugehörigen wissenschaftlichen Datenaufbereitung, der Methodenentwicklung und insbesondere als Grundlage für ereignis- und anlagenübergreifende generische Untersuchungen. Die Auswertung von Erfahrungen aus kerntechnischen Anlagen wird seit Ende der 70er Jahren von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrage des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und der vormals zuständigen Ministerien durchgeführt. Die Nutzung der vielfältigen Auswertungsergebnisse ist ein wesentlicher Bestandteil der Wissensbasis der GRS zur Weiterentwicklung von Methoden zur Verbesserung des Sicherheitsniveaus der im Nachbetrieb und im Rückbau befindlichen deutschen Kernkraftwerke und der deutschen Forschungsreaktoren.

Die umfangreiche Auswertung von Erfahrungen kann darüber hinaus auch der Bundesaufsicht nach Artikel 85 GG über den Vollzug des Atomgesetzes (AtG) durch die Bundesländer die Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren betreffend, als Grundlage bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben dienen.

Die Arbeiten der GRS innerhalb des Vorhabens konzentrieren sich im Wesentlichen auf

- die Auswertung von Erfahrungen mit ingenieurtechnischen und wissenschaftlichen Methoden und
- die fachlich interdisziplinäre Beurteilung der anlagenübergreifenden Bedeutung von gemeldeten nationalen und internationalen Ereignissen sowie

- den Austausch von Betriebserfahrung im Rahmen internationaler Projekte und Arbeitsgruppen.

In diesem Bericht werden nach einer allgemeinen Darstellung der Vorgehensweise zur Auswertung von Betriebserfahrung (Kapitel 2) für den Zeitraum April 2024 bis März 2025, wichtige Ergebnisse der kontinuierlichen Auswertung von Betriebserfahrung (Kapitel 3), der Precursor-Analysen (Kapitel 4), der generischen Auswertung von Rückflüssen zu Weiterleitungsnachrichten (Kapitel 5) sowie zusätzlicher weiterführender Arbeiten (Kapitel 6) vorgestellt.

2 Vorgehensweise zur Auswertung von Erfahrungen

2.1 Hintergrund

Die wissenschaftliche Auswertung der Erfahrungen von Kernreaktoren und anderen kerntechnischen Einrichtungen ist ein international anerkanntes und durchgeführtes Vorgehen, um durch die Verfolgung und Bewertung von Ereignissen einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der kerntechnischen Sicherheit von laufenden und abgeschalteten Anlagen zu leisten. Einen umfassenden Überblick des Standes von Wissenschaft und Technik hinsichtlich des Erfahrungsrückflusses aus der Auswertung von Ereignissen bietet der Specific Safety Guide SSG-50 der IAEA „Operating Experience Feedback for Nuclear Installations“ /IAEA 18/, der in wesentlichen Punkten nachfolgend dargestellt wird.

Die systematische Untersuchung und Bewertung von Ereignissen, die in kerntechnischen Anlagen auftreten, die Überprüfung auf eine mögliche anlagenübergreifende Relevanz sowie die Verbreitung und der Austausch der erarbeiteten Ergebnisse tragen zur Verbesserung der nuklearen Sicherheit bei. Für ein effektives nationales System zur Auswertung und Nutzung von Erfahrungsrückflüssen sollen nach /IAEA 18/ folgende Schwerpunkte durch die Aufsichtsbehörden und beteiligte Organisationen abgedeckt werden:

- Sichtung der gemeldeten nationalen und internationalen Ereignisse mit sicherheitstechnischer Bedeutung bzw. der Precursor-Ereignisse (Ereignisse, bei denen die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Kernschaden erhöht war); Untersuchung und Bewertung dieser Ereignisse hinsichtlich anlagenübergreifender Relevanz und Priorität der weiteren Analyse,
- unabhängige Untersuchungen und Detailanalysen zu sicherheitsrelevanten nationalen und internationalen Ereignissen und die Erarbeitung von Verbesserungsmaßnahmen aufgrund der erarbeiteten Untersuchungsergebnisse,
- systematische Verfolgung sicherheitsrelevanter Ereignismerkmale,
- Verfolgung der Durchführung von Verbesserungsmaßnahmen,
- kontinuierliche Aktualisierung der Programme zur Verfolgung und Verbesserung der Auswertung von Betriebserfahrung zur Erhöhung der kerntechnischen Sicherheit,

- Verbreitung und Austausch von Ergebnissen, auch unter Nutzung internationaler Systeme sowie
- Bereitstellung eines Systems zur Archivierung, Abrufung und Dokumentation der zur Auswertung von Betriebserfahrung zugehörigen Daten.

Diese in /IAEA 18/ geforderten Schwerpunkte werden im Rahmen des diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhabens wie folgt umgesetzt:

Der Auswahlprozess der Ereignisse (Screening) dient dazu, sicherheitsrelevante Ereignisse, die anlagenübergreifende Relevanz haben, für weitere Untersuchungen auszuwählen. Das Screening basiert dabei im Wesentlichen auf einer ingenieurmäßigen Bewertung der Ereignisse und wird von interdisziplinären Arbeitsgruppen durchgeführt. Die systematische Verfolgung sicherheitsrelevanter Ereignismerkmale, die dokumentiert und in Datenbanken abgelegt werden, stellt die Auswertung von Ereignissen der Vergangenheit dar und hat zum Ziel, frühzeitig die Erkennung von negativen Abweichungen von ausgewählten Sicherheitsaspekten aufzuzeigen, sodass rechtzeitig Untersuchungen und Abhilfemaßnahmen ergriffen werden können, um signifikante Ereignisse präventiv zu verhindern.

Precursor-Analysen bewerten gemeldete Ereignisse hinsichtlich ihres probabilistischen Beitrags zur Häufigkeit von auslegungsüberschreitenden Ereignisabläufen. Im Rahmen des Vorhabens werden solche Precursor-Ereignisse identifiziert und analysiert. Durch die hierbei ggf. notwendige Weiterentwicklung der Precursor-Analysemethoden wird der Stand von Wissenschaft und Technik weiterentwickelt.

Für ausgewählte sicherheitsrelevante Ereignisse werden weitergehende detaillierte Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, die Ursachen für das zu untersuchende Ereignis zu klären.

Durch die Teilnahme an internationalen Systemen und Gremien zum Austausch von Betriebserfahrung wird eine Vielzahl von Ereignissen, weiterer Erfahrung und bereits getroffener Abhilfemaßnahmen zusätzlich berücksichtigt. Hierdurch werden Wissens- und Datenbasis zur Auswertung und Nutzung von Betriebserfahrung erhöht. Die Nutzung internationaler Systeme ermöglicht zudem das Pflegen internationaler Kontakte, um auch zukünftig einen breit gefächerten Erfahrungsaustausch zu gewährleisten und sicherheitstechnische Erkenntnisse frühzeitig zu gewinnen.

2.2 Ziele

Übergeordnetes Ziel der vertieften Auswertung von Ereignissen, unter Nutzung der sonstigen sicherheitsrelevanten Erfahrungen aus in- und ausländischen Kernreaktoren, ist die Gewinnung von wissenschaftlichen Erkenntnissen und Daten zur Erweiterung der Wissensbasis der GRS.

Konkret trägt die Auswertung von Betriebserfahrungen dazu bei,

- den im Rahmen der Genehmigungen nachgewiesenen Sicherheitsstand der Kernreaktoren und weiterer kerntechnischer Einrichtungen anhand der Kenntnisse aus dem aktuellen Anlagenbetrieb und Rückbau zu verfolgen und zu dokumentieren,
- sicherheitstechnische und organisatorische Schwachstellen in den Anlagen zu erkennen,
- sicherheitstechnische und organisatorische Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren sowie
- eine wissenschaftliche Basis für die Weiterentwicklung von Sicherheitsstandards zu schaffen.

Die Arbeitsergebnisse können auch als Grundlage für das BMUV bei der Wahrnehmung seiner bundesaufsichtlichen Aufgaben dienen.

2.3 Informationsfluss und Quellen

Die Meldung von sicherheitstechnisch bedeutsamen Ereignissen ist in Deutschland in der „Verordnung über den kerntechnischen Sicherheitsbeauftragten und über die Meldung von Störfällen und sonstigen Ereignissen“ (Atomrechtliche Sicherheitsbeauftragten und Meldeverordnung – AtSMV) geregelt.

Die Bereitstellung und Verbreitung internationaler Betriebserfahrung erfolgt über internationale Informationssysteme wie INES oder IRS.

Die GRS wertet verschiedene Quellen zur Betriebserfahrung aus Kernkraftwerken des In- und Auslandes aus.

Im Einzelnen sind dies:

- meldepflichtige Ereignisse,
- Betriebsberichte (RSK-, Monats- und Jahresberichte),
- IRS-Meldungen,
- INES-Meldungen,
- Licensee Event Reports (LERs) der U.S. NRC (auf Basis eines Screenings der Kurzfassungen neu gemeldeter LERs),
- Informationen von Tagungen und aus sonstigem Erfahrungsaustausch mit anderen Institutionen (national, international),
- sonstige Informationen (Pressemitteilungen, Internet, etc.).

Der Informationsfluss bei der Auswertung nationaler und internationaler Betriebserfahrung wird in Abb. 2.1 schematisch dargestellt.

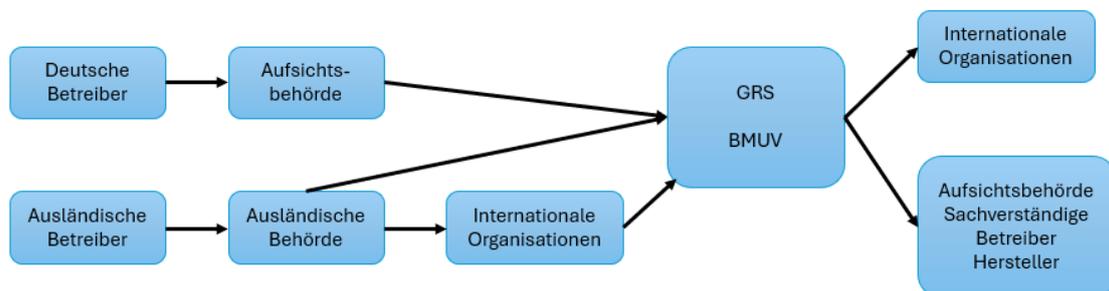


Abb. 2.1 Informationsfluss bei der Auswertung nationaler und internationaler Betriebserfahrung

2.4 Vorgehen

Basis der Arbeiten ist die Auswertung nationaler und internationaler meldepflichtiger Ereignisse sowie sonstiger Erfahrung und Informationen, die im Rahmen eines ingenieurtechnischen Screenings erfolgt. Zunächst erfolgt ein wöchentliches Erstscreening im Rahmen einer interdisziplinären Arbeitsgruppe, die die zuständigen Fachgebiete festlegt und bei sofortigem Handlungsbedarf eine priorisierte Bearbeitung einleitet. Für jedes Ereignis erfolgt dann durch einen oder mehrere Bearbeiter der zuständigen Fachgebiete zunächst eine Recherche, die Datenbanken und weitere inhaltlich betroffene Fachgebiete innerhalb der GRS einbezieht, aber auch zugängliche oder auf Anfrage erhaltene Informationen von Behörden, Gutachtern, Betreibern oder Herstellern umfasst. Auf dieser Grundlage erfolgen regelmäßige Durchsprachen der Ereignisse in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe, die neben Maschinen- und Systemtechnik, Elektro- und Leittechnik und Komponentenintegrität auch Fachgebiete wie Human Factors und Managementsysteme abdeckt. Eine zentrale Frage bei diesen Untersuchungen ist die Übertragbarkeit auf deutsche Kernreaktoren.

Um in diesem Vorhaben die Berücksichtigung eines auf breiter Grundlage zu ermittelnden Standes von Wissenschaft und Technik zu realisieren, bezieht die GRS zusätzlich externen Sachverstand mit ein. So werden das Öko-Institut e.V. und das Physikerbüro Bremen als Unterauftragnehmer hinzugezogen und nehmen an den regelmäßigen Vorkommnisbesprechungen der interdisziplinären Arbeitsgruppe teil.

Jedes untersuchte Vorkommnis (meldepflichtiges Ereignis oder sonstige Erfahrungen und Informationen) wird GRS-intern mit sicherheitsrelevanten Merkmalen und einem Kurzbericht dokumentiert und in Datenbanken abgelegt. Die dabei vorgenommene Kodierung dient zur Charakterisierung der sicherheitstechnischen Bedeutung eines Ereignisses in Kombination mit der beteiligten Anlagentechnik und der jeweiligen beim Ereignis vorliegenden betrieblichen Situation sowie menschlichen Einflussgrößen. Die statistische Auswertung sicherheitsrelevanter Merkmale mit Hilfe der Datenbanken wird zur Ermittlung von sicherheitsrelevanten Auffälligkeiten herangezogen. Dies stellt eine der Grundlagen für die Betrachtungen im Rahmen des Screening-Prozesses dar. Solche Analysen können somit als Initiator und Ausgangspunkt für ereignis- und anlagenübergreifende generische Untersuchungen dienen. Die Auswertung internationaler Ereignisse wird im Rahmen eines anderen Vorhabens ebenfalls durch monatliche Berichte dokumentiert.

Bei einer aus der Auswertung der Betriebserfahrung im Rahmen des Screening-Prozesses abgeleiteten generischen Problemstellung (tatsächliche oder potentielle sicherheitstechnische Bedeutung für andere Anlagen) erfolgen detaillierte und umfassende Analysen der ereignis- und anlagenübergreifenden Aspekte. Sie können beispielsweise detaillierte Literaturrecherchen, Untersuchungen mit den anlagenspezifischen Analysesimulatoren der GRS oder Fachgespräche mit Behörden, Gutachtern, Betreibern oder Herstellern umfassen. Zum Teil erfolgen solche weiterführenden Arbeiten, z. B. die Erstellung einer Weiterleitungsnachricht im Auftrag des BMUV, in anderen Vorhaben.

Tatsächlich oder potentiell sicherheitstechnisch bedeutsam sind Ereignisse, die Mängel hinsichtlich der mehrfachen Ausbildung der Barrieren oder in den Vorkehrungen zum Schutz der Barrieren auf den einzelnen Ebenen des gestaffelten Sicherheitskonzeptes aufzeigen. Darauf können insbesondere folgende Punkte hindeuten:

- Nichterfüllung von Auslegungsmerkmalen für einzelne Sicherheitsebenen,
- nicht auslegungs- bzw. erfahrungsgemäßes System- oder Komponentenverhalten,
- bedeutsame Erhöhung der Wahrscheinlichkeit störfallauslösender Ereignisse oder der Wahrscheinlichkeit für Schadenszustände des Sicherheitssystems,
- Ausfälle aufgrund gemeinsamer Ursache oder systematische Fehler, die auf einer einzelnen, aber auch auf mehreren Ebenen gleichzeitig wirksam werden können,
- Mängel im administrativen Bereich, die alle Ebenen betreffen können, z. B. in Betriebsvorschriften, im Instandhaltungswesen, im Prüfkonzept und im Schulungswesen.

Die Ergebnisse des Screening-Prozesses werden GRS-intern dokumentiert und stellen eine zusätzliche Informationsquelle für die Auswertung zukünftiger Ereignisse dar. In einem jährlichen Bericht – wie dem vorliegenden – werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst (siehe Kapitel 3).

Vorkommnisse werden zudem auf eine Precursor-Relevanz hin vorselektiert. Für diese ausgewählten Vorkommnisse erfolgt anschließend eine detaillierte Precursor-Analyse, ggf. unter Weiterentwicklung der zur Bewertung notwendigen Methoden. Vorkommnisse, deren Precursor-Analyse eine bedingte Wahrscheinlichkeit für den Eintritt von Gefährdungszuständen $> 10^{-6}$ ergibt, werden als Precursor eingestuft und dokumentiert (siehe Kapitel 4).

Durch die diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhaben und deren durchgeführte Untersuchungen ausgewählter aktueller Ereignisse in ausländischen Kernkraftwerken, die Beteiligung an internationalen Projekten und Arbeitsgruppen zum Thema Betriebserfahrung sowie die generische Auswertung von Rückflüssen zu Weiterleitungsnachrichten (siehe Kapitel 5) werden zusätzliche Quellen für die Betriebserfahrung erschlossen, die ggf. im Rahmen generischer Analysen weiterverfolgt werden.

Ein schematischer Überblick bezüglich der Vorgehensweise zur Auswertung von Betriebserfahrung findet sich in Abb. 2.2.

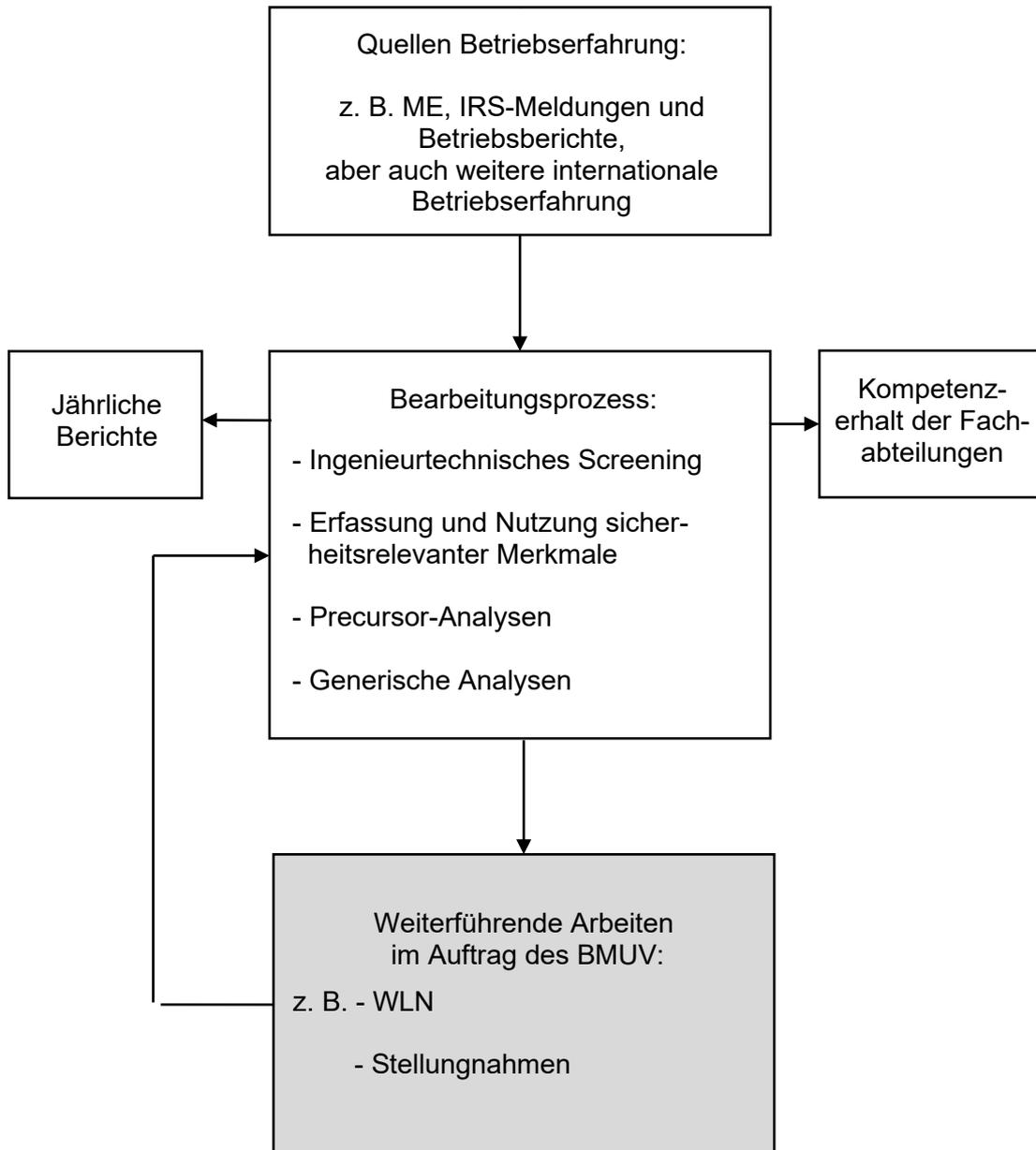


Abb. 2.2 Überblick zur Auswertung von Betriebserfahrung (die grau hinterlegten Arbeiten sind nicht Gegenstand des Vorhabens 4724R01311)

3 Ergebnisse der kontinuierlichen Auswertung von Betriebserfahrung

Zu sicherheitsrelevanten Aspekten, die im Rahmen des ingenieurtechnischen Screenings von Quellen der Betriebserfahrung erkannt wurden, wurden ereignis- bzw. anlagenübergreifende vertiefte Untersuchungen durchgeführt. Im Folgenden werden wesentliche Ergebnisse aus dem Berichtszeitraum dargestellt. Diese wurden entsprechend ihrem jeweiligen thematischen Schwerpunkt gruppiert. In vielen Fällen sind aber auch Aspekte weiterer Fachgebiete betroffen, zudem sind in verschiedenen Fällen menschliche oder organisatorische Einflussfaktoren mitwirkend.

3.1 Elektro- und Leittechnik

3.1.1 „Defekt von Zenerdioden in Leittechniksschränken“

Im September 2020 wurde in einer im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen DWR-Anlage während der Revision eine wiederkehrende Funktionsprüfung von Überspannungsschutzeinrichtungen an sicherheitsrelevanten Leittechniksschränken durchgeführt. Im Rahmen dieser WKP werden in den Einspeisezeilen von Leittechniksschränken eingesetzte 3-fach-Diodenblöcke geprüft. In diesen Diodenblöcken sind jeweils drei Zenerdioden in einem steckbaren Kunststoffgehäuse eingebaut.

Bei der WKP an den Diodenblöcken wurde festgestellt, dass eine Zenerdiode in einem 3-fach-Diodenblock aus einem Leittechniksschrank im Notspeisegebäude im Hinblick auf die zu messende Zenerspannung außerhalb der zulässigen Toleranz lag. Eine durchgeführte Sichtprüfung der betroffenen Diode ergab, dass sie eine Unterbrechung im Anschlussbereich aufwies. Eine visuelle Kontrolle weiterer 3-fach-Diodenblöcke gleichen Typs ergab optische Auffälligkeiten an den Lötverbindungen im Anschlussbereich von zwei weiteren Diodenblöcken aus zwei Leittechniksschränken im Schaltanlagegebäude. Daraufhin wurden alle in der Anlage vorhandenen 3-fach-Diodenblöcke des betroffenen Typs überprüft. Es wurden hierbei teilweise mangelhafte Lötverbindungen und Unterbrechungen im Anschlussbereich der Dioden sowie defekte Anschlussfahnen festgestellt. Es wurden insgesamt zehn Unterbrechungen im Anschlussbereich der Dioden ermittelt.

Die betroffenen Diodenblöcke wurden im Jahr 2015 im Rahmen einer vorbeugenden Instandhaltungsmaßnahme von einer Fremdfirma überholt. Hierbei wurden einzelne Dioden aus den 3-fach-Diodenblöcken ausgetauscht. Die auszutauschenden Dioden wurden hierfür zunächst von den Anschlussfahnen der Diodenblöcke getrennt. Anschließend wurden die Austauschdioden an den Anschlussfahnen mittels Lötverbindungen erneut angeschlossen.

Bei der Durchführung der genannten wiederkehrenden Funktionsprüfung an den Diodenblöcke werden diese einzeln den Einspeisezeilen von Leittechniksschränken entnommen (Ziehen) und auf ein spezielles Prüfgerät adaptiert (Stecken). Nach erfolgreicher Prüfung der elektrischen Parameter (Zenerspannung und Leckstrom) der Dioden werden die Diodenblöcke dem Prüfgerät entnommen (Ziehen) und wieder in die Einspeisezeilen der Leittechniksschränke gesteckt (Stecken).

Aufgabe der Diodenblöcke ist es, Auswirkungen von transienten Überspannungen, die beispielsweise durch das Ansprechen von Sicherungen oder durch Blitzeinwirkungen auftreten könnten, zu begrenzen, um somit Komponenten für die signaltechnische Aufbereitung von Schrankstörmeldungen und für die Überwachung der Schrankeinspeisung vor Spannungsspitzen zu schützen.

Die festgestellten Unterbrechungen an den betroffenen Diodenblöcken sind auf die hohen mechanischen Kräfte bei der Handhabung der Diodenblöcke (Ziehen, Stecken) im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung der Diodenblöcke in Verbindung mit mangelhaften Lötverbindungen bei der Überholung der Diodenblöcke im Jahr 2015 zurückzuführen. Diese Unterbrechungen führten zur Unterbrechung der elektrischen Verbindung zwischen den Diodenanschlüssen und den Anschlüssen der Trennklemmen in den Leittechniksschränken. Hierdurch war der Überspannungsschutz für die betroffenen Komponenten nicht mehr gegeben.

In der Revision 2020 wurden alle in der Anlage vorhandenen Diodenblöcke des betroffenen Typs ertüchtigt. Alle Lötstellen wurden wärmebehandelt, um mechanische Spannungen zu beseitigen und die defekten Anschlussfahnen wurden instandgesetzt. Im Jahr 2023 erfolgte eine Sichtprüfung der Lötverbindungen an Diodenblöcken, die im Nachbetrieb als sicherheitstechnisch wichtig angesehen werden. Dabei wurden einige optisch auffällige Lötverbindungen identifiziert, die messtechnisch ohne Befund überprüft wurden.

Um die mechanischen Belastungen durch häufiges Ziehen und Stecken bei der Prüfung der Diodenblöcke zu reduzieren, wurde das Prüfindervall von vier Jahren (25 % pro Jahr) auf zehn Jahre (10 % pro Jahr) verlängert.

Die Erkenntnisse aus diesem Ereignis sind auf andere deutsche Anlagen übertragbar, da die betroffenen Diodenblöcke oder vergleichbar aufgebaute Überspannungsschutzgeräte auch in anderen Anlagen eingesetzt sind. Das Ereignis deutet zudem darauf hin, dass die festgestellten Defekte sich auf die im Rahmen der WKP zu messenden elektrischen Parameter der Dioden latent auswirken und somit auf die Überspannungsschutzfunktion in den betroffenen Leittechnikschränken. Derartige latente Fehler konnten im Rahmen der nach einer WKP an den Zenerdioden erfolgten Funktionsprüfungen in ihrer bisherigen Ausführung nicht erkannt/erfasst werden. Es ist nicht auszuschließen, dass dies zu Beeinträchtigung von Sicherheitsfunktionen führen kann.

Die GRS empfiehlt, sofern Diodenblöcke und/oder vergleichbar aufgebaute Überspannungsschutzgeräte mit Zenerdioden in sicherheitstechnisch wichtigen Leittechnikschränken in der Anlage eingesetzt sind, zu prüfen, ob wiederkehrende Prüfungen dieser Überspannungsschutzgeräte in ihrer bisherigen Ausführung geeignet sind, mechanische Defekte an den Zenerdiodenblöcken (z. B. Unterbrechungen im Anschlussbereich der Dioden) zuverlässig zu erkennen. Ist dies nicht der Fall, ist zur Sicherstellung des Überspannungsschutzes in sicherheitstechnisch wichtigen Leittechnikschränken das WKP-Konzept für Diodenblöcke und/oder für vergleichbar aufgebaute Überspannungsschutzgeräte mit Zenerdioden durch entsprechende geeignete Maßnahmen (z. B. Sichtprüfungen, Bestimmung von Übergangswiderständen im eingebauten Zustand, Isolationsmessung) anzupassen.

3.2 Mensch – Technik – Organisation

3.2.1 „Geringfügige Leckage an der Wandauskleidung des Abstellbeckens“

In einer abgeschalteten deutschen DWR-Anlage kam es im Jahr 2021 während Demontagetarbeiten an Kerneinbauten zu einer Beschädigung der Wandauskleidung des Abstellbeckens und nachfolgenden zu einer geringfügigen Leckage.

Bei dem betroffenen, bereits zusammengepressten Kernbauteil handelte es sich um ein Steuerelementführungsrohr mit einer Masse von etwa 80 kg, bei dem ein Trennschnitt

unter Wasser im Abstellbecken durchgeführt werden sollte. Um die Kerneinbauteile zersägen zu können, müssen diese von der senkrechten in die waagerechte Position gebracht werden. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten im Abstellbecken wurde der dort gelagerte obere Rost als Ablageort verwendet. Für den Fall eines Lastabsturzes wurde der Beckenboden darunter mit Schutzplatten ausgelegt. Aufgrund dieser Maßnahme hätte ein senkrecht Absinken eines Teiles keinen Schaden am Beckenboden bewirken können.

Das Ereignis ereignete sich auf Grund von Kommunikationsproblemen zweier Mitarbeiter. Ein Mitarbeiter hatte das Kerneinbauteil unter Verwendung des 1 Mg-Krans bereits in die Horizontale auf den Zerlegeplatz gehoben und bereitete den Trennvorgang des Kerneinbauteils vor. Dazu bediente er den 3 Mg-Kran und blickte zur Überwachung des Vorgangs in das Abstellbecken, da für den Zerlegevorgang das Kerneinbauteil an diesen 3 Mg-Kran angehängen werden muss, so dass es beim Zerlegevorgang durch beide Kräne gesichert ist. Ein zweiter Mitarbeiter kam von einer anderen Tätigkeit hinzu und machte die falsche Annahme, der Kollege wolle das Anheben eines neuen Kerneinbauteils aus dem Belademagazin mittels des 1 Mg-Krans vorbereiten. Um den vermeintlichen Vorgang zu unterstützen, öffnete der zweite Mitarbeiter ohne vorherige Rücksprache mit seinem Kollegen den Greifer des 1 Mg-Krans. Aufgrund der noch nicht erfolgten Sicherung des Kerneinbauteils am 3 Mg-Kran kam es infolgedessen zum Absturz des Kerneinbauteils durch das Absinken in einer „pendelnd-segelnden Bewegung“. Da an der Auskleidung des Beckens keine Beschädigungen zu erkennen waren, erfolgte keine Meldung bzgl. des Absinkens des Kerneinbauteils.

Zwölf Stunden später wurde eine Leckage am Abstellbecken im Rahmen einer den Vorgaben entsprechenden Begehung anhand des Leckageüberwachungssystems entdeckt. Durch die „pendelnd-segelnde“ Bewegung war das Kerneinbauteil an die seitliche Auskleidung des Abstellbeckens gestoßen und hatte einen Riss in der seitlichen Auskleidung des Abstellbeckens verursacht. Die Leckage wurde über das Leckageüberwachungssystem und die nukleare Gebäudeentwässerung der nuklearen Abwasseraufbereitung zugeführt. Eine sichtbare Füllstandsabsenkung konnte im Abstellbecken nicht beobachtet werden. Durch die Leckage gab es keine Auswirkungen auf den radiologischen Arbeitsschutz.

Durch die Auswertung der Ereignisse wurden Mängel in den Bereichen „Prinzipien sicherheitsgerichteten Arbeitens“ und „Planung von Arbeiten“ identifiziert. Diese Erkenntnisse können auch für andere abgeschaltete deutsche Anlagen relevant sein, da die

Demontage- bzw. Zerlegungsarbeiten an Kerneinbauteilen im Rahmen des Rückbaus in allen deutschen Anlagen durchzuführen sind. Daher empfiehlt die GRS bei der Planung von Arbeiten unter Wasser zu berücksichtigen, dass Werkstücke bei einem möglichen Lastabsturz nicht in gerader Linie nach unten absinken könnten. In diesem Sinne sind geeignete Maßnahmen zu prüfen, um eine mögliche Beschädigung der Beckenauskleidung zu vermeiden. Außerdem ist es in den betrieblichen Regelungen festzulegen, wie Mitarbeiter, die nach einer Arbeitsunterbrechung zu laufenden Arbeiten zurückkehren, vor Arbeitsaufnahme über den Stand der Arbeiten, zwischenzeitlicher Änderungen und Fortschritte informiert werden. Schließlich sind alle Mitarbeiter einschließlich Fremdfirmenmitarbeiter zu sensibilisieren, dass Abweichungen vom vorgesehenen Arbeitsablauf zu melden sind; dafür müssen geeignete Maßnahmen (z. B. Schulungen oder sonstige Unterweisungen) vorgesehen werden.

4 Ergebnisse der Precursor-Analysen

4.1 Einleitung

Die Ergebnisse der im Berichtszeitraum von Januar 2021 bis April 2023 abgeschlossenen Precursor-Analysen meldepflichtiger Ereignisse deutscher Kernkraftwerke, werden im Folgenden beschrieben. Als Precursor (englisch für „Vorläufer, Vorbote“) werden Ereignisse in Kernkraftwerken bezeichnet, die – durch eine Beeinträchtigung der Funktion sicherheitsrelevanter Einrichtungen, durch eine betriebliche Störung oder durch einen Störfall – die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden am Reaktorkern vorübergehend deutlich erhöhen. Precursor-Analysen berechnen diese Wahrscheinlichkeit und liefern damit ein Maß für die sicherheitstechnische Bedeutung von meldepflichtigen Ereignissen.

Die Precursor-Analysen wurden in den folgenden Arbeitsschritten durchgeführt:

- **Vorauswahl der Ereignisse:**
Systematisches Screening meldepflichtiger Ereignisse hinsichtlich ihrer Precursor-Relevanz und die Auswahl von Ereignissen für eine quantitative Bewertung anhand von Kriterien
- **Probabilistische Bewertung:**
Quantitative Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung ausgewählter Ereignisse in Form einer Schwachstellenanalyse des DWR- bzw. SWR-typischen Sicherheitssystems
- **Expertenschätzungen zu potentiellen GVA:**
Durchführung der notwendigen Expertenbewertungen zur Ermittlung des Schädigungsgrades für Ereignisse mit potentiellen Ausfällen aufgrund gemeinsamer Ursache (GVA)
- **Methodenweiterentwicklung:**
Weiterentwicklung der Methoden zur Precursor-Analyse für solche Ereignisse, die bisher nicht probabilistisch bewertet werden konnten

Die Vorgehensweise und die Zielsetzung der Precursor-Analysen sind im Bericht „Precursor-Analysen, Teil III, Methoden zur probabilistischen Bewertung von betrieblichen Ereignissen“ /GRS 14/ dargestellt.

4.2 Vorauswahl von Ereignissen

Im Jahr 2021 wurden insgesamt 38 meldepflichtige Ereignisse in deutschen Kernkraftwerken (Druck- und Siedewasserreaktoranlagen) gemeldet. Davon wurden fünf Ereignisse mittels eines Kriterienkataloges /GRS 14/ für eine detaillierte probabilistische Bewertung vorausgewählt. Diese fünf Ereignisse traten in Druckwasserreaktoranlagen auf.

Im Zeitraum von Januar 2022 bis April 2023 wurden insgesamt 56 meldepflichtige Ereignisse in deutschen Kernkraftwerken (Druck- und Siedewasserreaktoranlagen) gemeldet. Davon wurden sieben Ereignisse für eine detaillierte probabilistische Bewertung vorausgewählt. Diese sieben Ereignisse traten in Druckwasserreaktoranlagen auf.

In Tab. 4.1 sind die für die Weiterbehandlung vorausgewählten Ereignisse des Jahres 2021 und die Ergebnisse der probabilistischen Bewertungen dieser Ereignisse zusammengestellt. Tab. 4.2 enthält die gleichen Angaben für die Ereignisse des Zeitraums von Januar 2022 bis April 2023. Die Tabellen enthalten die folgenden Angaben zu den Ereignissen:

- Ereignisnummer,
- Kraftwerkstyp,
- Kurzbeschreibung des Ereignisses,
- Informationen zum Betriebszustand bei Eintritt bzw. bei Erkennen des meldepflichtigen Ereignisses und zur Art der Erkennung,
- das aufgetretene oder postulierte auslösende Ereignis bzw. die Ereignisart,
- die Kategorie des Kriterienkatalogs entsprechend dem Methodenbericht /GRS 14/ Teil III, Anhang A, Tabelle A.1, nach der die Vorauswahl des Ereignisses erfolgte,
- die ermittelten bedingten Wahrscheinlichkeiten für Gefährdungszustände aufgrund des Ereignisses und dessen Einstufung.

Tab. 4.1 Vorausgewählte Ereignisse des Jahres 2021 und Ergebnisse der probabilistischen Bewertungen

ME-Nr.	Kraftwerks-typ	Betriebszu-stand	Kurzbeschreibung des Ereignisses	Erkennung ¹⁾	Auslösen-des Ereignis ^{1) 2)}	Kate-gorie ³⁾	Bedingte Wahrschein-lichkeit für Gefähr-dungszu-stände	Precursor/ kein Precursor ⁵⁾
2021/005	DWR	Leistungsbe-trieb	Funktionsstörung des Leistungsstellereinschubes eines Durchflussbegrenzungsventils im Notspeisewassersystem	WKP	(Notstromfall)	1	$5,8 \cdot 10^{-8}$	kein Precursor
2021/007	DWR	Leistungsbe-trieb	Bruch eines Abgaskrümmers an einem Notstromdiesel	WKP	(Notstromfall)	1	$3,3 \cdot 10^{-9}$	kein Precursor
2021/025	DWR	Leistungsbe-trieb	Interne Kühlwasserleckage an einem Abgasturbolader eines Notstromdiesels	Wartenmel-dung	(Notstromfall)	1	$1 \cdot 10^{-8}$	kein Precursor
2021/028	DWR	Leistungsbe-trieb	Funktionsstörung eines Saugschiebers im Not-nebenkühlwassersystem	vorbeugende Instandhal-tungsmaß-nahme	(Ausfall der BELB-Kühlung)	1	$1,6 \cdot 10^{-7}$ ⁴⁾	kein Precursor
2021/037	DWR	Leistungsbe-trieb	Messwertabweichung an Füllstandsmessungen des Zusatzboriersystems bei Wiederkehrender Prüfung	WKP	(DE-Heizrohrleck)	1	$< 1 \cdot 10^{-10}$	kein Precursor

¹⁾ WKP steht für wiederkehrende Prüfung, BELB für Brennelement-Lagerbecken

²⁾ Klammern () bedeuten, dass es sich um das maßgebliche postulierte auslösende Ereignis handelt, das auslösende Ereignis jedoch nicht eingetreten ist.

³⁾ 0 = Kein Einfluss auf die Häufigkeit von Schadenszuständen. 1 = Funktionsstörung in Sicherheitssystem; Eintrittshäufigkeit des anfordernden auslösenden Ereignisses \geq ca. $1E-02/a$. 2 = Funktionsstörung in Sicherheitssystem; Eintrittshäufigkeit des anfordernden auslösenden Ereignisses $<$ ca. $1E-02/a$. 3 = Funktionsstörung in Sicherheitssystem; Eintrittshäufigkeit des anfordernden auslösenden Ereignisses $<$ ca. $1E-05/a$ (mittlerer oder großer Kühlmittelverlust, ATWS, Einwirkungen von außen). 4 = Auslösendes Ereignis mit Anforderung von Sicherheitssystemen. 5 = Betriebsstörung (ohne Anforderung von Sicherheitssystemen). 6 = Fälschliche Anforderung von Sicherheitssystemen. 7 = Potentielles auslösendes Ereignis. 8 = Potenzielle Funktionsstörung. Die Kategorien sind im Methodenbericht /GRS 14/ Teil III, Anhang A, Tabelle A.1, weiter beschrieben.

⁴⁾ Bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschadenszustände

⁵⁾ Ereignisse, für welche die bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände/Brennstabschadenszustände aufgrund des Ereignisses $\geq 10^{-6}$ beträgt, als Precursor eingestuft.

Tab. 4.2 Vorausgewählte Ereignisse für den Zeitraum von Januar 2022 bis April 2023 und Ergebnisse der probabilistischen Bewertungen

ME-Nr.	Kraftwerks-typ	Betriebszu-stand	Kurzbeschreibung des Ereignisses	Erkennung ¹⁾	Auslösen-des Ereignis ¹⁾²⁾	Kate-gorie ³⁾	Bedingte Wahrschein-lichkeit für Gefähr-dungszu-stände	Precursor/ kein Precursor
2022/005	DWR	Nachbetrieb	Tropfleckage an einer Schweißnaht im gesicherten Zwischenkühlsystem nach erfolgter Druckprobe	WKP	(Notstromfall)	1	$2,6 \cdot 10^{-8}$ ⁴⁾	kein Precursor
2022/019	DWR	Revision	Druckabfall an einer gesicherten Nebenkühlwasserpumpe	Wartenmel-dung	(Ausfall Nachkühl-stränge)	2	$5,5 \cdot 10^{-8}$	kein Precursor
2022/020	DWR	Nachbetrieb	Riss am Metallkompensator der Kraftstoffsaug-leitung eines Notspeisenotstromdiesels	Wartung	(Notstromfall)	1	$1,2 \cdot 10^{-8}$ ⁴⁾	kein Precursor
2022/027	DWR	Nachbetrieb	Ausfall eines Umluftventilators im Notspeisege-bäude bei Wiederkehrender Prüfung	WKP	(Notstromfall)	1	$1,3 \cdot 10^{-9}$ ⁴⁾	kein Precursor
2022/030	DWR	Nachbetrieb	Ausfall der Beckenkühlpumpe FAK20AP001 wegen Druck- und Durchsatzschwankungen	Wartenmel-dung	Ausfall BELB-Kühlung	4	$5,9 \cdot 10^{-7}$ ⁴⁾	kein Precursor
2022/039	DWR	Leistungsbe-trieb	Kleinstleckage am Gummikompensator eines Kühl-wassersystems an einem Notstromdiesel	Rundgang	(Notstromfall)	1	$6 \cdot 10^{-9}$	kein Precursor
2023/007	DWR	Leistungsbe-trieb	Abweichung beim Maß zwischen Pleuelstange und Gegengewicht der Pleuelstange am Notstromdie-selaggregat XJA40	Wartung	(Notstromfall)	1	$4,1 \cdot 10^{-7}$	kein Precursor

¹⁾ WKP steht für wiederkehrende Prüfung, BELB für Brennelement-Lagerbecken, DE für Dampferzeuger

²⁾ Klammern () bedeuten, dass es sich um das maßgebliche postulierte auslösende Ereignis handelt, das auslösende Ereignis jedoch nicht eingetreten ist.

³⁾ 0 = Kein Einfluss auf die Häufigkeit von Schadenszuständen. 1 = Funktionsstörung in Sicherheitssystem; Eintrittshäufigkeit des anfordernden auslösenden Ereignisses \geq ca. $1E-02/a$. 2 = Funktionsstörung in Sicherheitssystem; Eintrittshäufigkeit des anfordernden auslösenden Ereignisses $<$ ca. $1E-02/a$. 3 = Funktionsstörung in Sicherheitssystem; Eintrittshäufigkeit des anfordernden auslösenden Ereignisses $<$ ca. $1E-05/a$ (mittlerer oder großer Kühlmittelverlust, ATWS, Einwirkungen von außen). 4 = Auslösendes Ereignis mit Anforderung von Sicherheitssystemen. 5 = Betriebsstörung (ohne Anforderung von Sicherheitssystemen). 6 = Fälschliche Anforderung von Sicherheitssystemen. 7 = Potentielles auslösendes Ereignis. 8 = Potenzielle Funktionsstörung. Die Kategorien sind im Methodenbericht /GRS 14/ Teil III, Anhang A, Tabelle A.1, weiter beschrieben.

⁴⁾ Bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschadenszustände

4.3 Ergebnisse der probabilistischen Bewertungen

Die 12 ausgewählten Ereignisse für den Zeitraum des Jahres 2021 und Januar 2022 bis April 2023 wurden probabilistisch bewertet. Fünf dieser Ereignisse betrafen die Brennelement-Lagerbeckenkühlung. Für diese Ereignisse wurde gemäß dem aktualisierten PSA-Leitfaden /FAK 15/ die bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschadenszustände ermittelt. Für keines der ausgewählten und im Detail probabilistisch bewerteten Ereignisse ergab sich eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände/Brennstabschadenszustände von $> 10^{-6}$. Somit ist keines der Ereignisse als Precursor einzustufen.

Die in Tab. 4.1 und Tab. 4.2 ausgewiesenen bedingten Wahrscheinlichkeiten für Gefährdungszustände/Brennstabschadenszustände beruhen zum Teil auf generischen Daten. Unsicherheiten der bedingten Wahrscheinlichkeiten wurden nicht ermittelt, da für die generische Bewertung der Ereignisse Unsicherheiten nicht benötigt werden, sondern dafür lediglich die Punktwerte aus der Precursor-Analyse und eine ingenieurmäßige Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung herangezogen werden.

Im Folgenden werden die wesentlichen Sachverhalte aus der Precursor-Analyse kurz dargestellt.

Ereignis 2021/005, DWR, „Funktionsstörung des Leistungsstellereinschubes eines Durchflussbegrenzungsventils im Notspeisewassersystem“:

Bei einer wiederkehrenden Prüfung wurde eine Stellgliedstörung für ein Durchflussbegrenzungsventil im Notspeisewassersystem gemeldet. Ursächlich dafür war die Fehlfunktion eines Thyristorumkehrsteller-Einschubs. Dieser wurde gegen ein Reservebauteil ausgetauscht. Aufgrund des Fehlers hätte das Durchflussbegrenzungsventil keine Regelbefehle ausgeführt. Für die Precursor-Bewertung wurde davon ausgegangen, dass aufgrund des Ausfalls der Regelung für das Durchflussbegrenzungsventil bei einem Notstromfall keine ausreichende Bespeisung des zugehörigen Dampferzeugers erfolgt wäre. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände von $5,8 \cdot 10^{-8}$ berechnet.

Ereignis 2021/007, DWR, „Bruch eines Abgaskrümmers an einem Notstromdiesel“:

Bei einer wiederkehrenden Prüfung wurde eine Auffälligkeit im Schließverhalten einer Schnellschlussklappe im Abgassystems eines Notstromdieselmotors festgestellt. Die daraufhin durchgeführte Inspektion ergab einen gebrochenen Abgaskrümmers. Die komplette Abgaseinheit des Motors wurde getauscht. Für die Precursor-Bewertung wurde davon ausgegangen, dass es aufgrund der vorgefundenen Schädigung bei einem Anforderungsfall zu Leistungseinschränkungen oder zum Ausfall des Notstromdiesels gekommen wäre. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände von $3,3 \cdot 10^{-9}$ berechnet.

Ereignis 2021/025, DWR, „Interne Kühlwasserleckage an einem Abgasturbolader eines Notstromdiesels“:

Über einen Zeitraum von 51 Tagen kam es wiederholt zu Meldungen über einen Füllstandsabfall im Kühlwasser-Ausgleichsbehälter eines Notstromdiesels. Die daraufhin durchgeführte Inspektion ergab eine Kühlwasserleckage an einem Abgasturbolader. Der Abgasturbolader wurde inklusive Abgaseinströmgehäuse getauscht. Für die Precursor-Bewertung wurde davon ausgegangen, dass der Notstromdiesel über den oben genannten Zeitraum von 51 Tagen nicht verfügbar war. In diesem Zeitraum war auch ein weiterer Notstromdiesel für Wartungsarbeiten freigeschaltet, so dass für ca. 9 Stunden zwei von vier Notstromdieseln nicht verfügbar waren. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände von $1 \cdot 10^{-8}$ berechnet.

Ereignis 2021/028, DWR, „Funktionsstörung eines Saugschiebers im Notnebenkühlwassersystem“:

Im Rahmen von Freischaltungen zur Durchführung vorbeugender Instandhaltungsmaßnahmen konnte ein Saugschieber vor einer Notnebenkühlwasserpumpe nicht mehr geöffnet werden, nachdem er in die ZU-Stellung verfahren worden war. Zur Behebung des Ausfalls war das Entleeren der Pumpenvorkammer für zwei Redundanzen erforderlich. Deshalb wurde entschieden die Komponente beim Abfahren der Anlage Anfang des Jahres 2022 zu inspizieren und instand zu setzen. Aufgrund des geschlossenen Saugschiebers war der betroffene Notnebenkühlwasserstrang für 103 Tage nicht verfügbar. Im anschließenden Reparaturzeitraum (ca. 2 Tage) waren durch das Entleeren der

Pumpenvorkammer zusätzlich die Redundanzen 1 und 2 des gesicherten Nebenkühlwassersystems nicht verfügbar. Ursache war der Bruch der Antriebsspindel des Saugschiebers.

Die Notnebenkühlwasserversorgung ist Teil der Notnachkühlkette. Sie kann bei drucklosem Primärkreis (Brennelementwechsel) und gleichzeitigem Ausfall des Notstromnetzes 1 die Nachkühlung und die Brennelement-Lagerbeckenkühlung übernehmen. Im vorliegenden Fall war nur die Brennelement-Lagerbeckenkühlung zu betrachten, da sich die Anlage, während der Nichtverfügbarkeit des Saugschiebers im Leistungsbetrieb befand und im Reparaturzeitraum die Nachwärme über die Sekundärseite abgeführt wurde. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschadenszustände von $1,6 \cdot 10^{-7}$ berechnet. Das Ergebnis wird durch den Reparaturzeitraum bestimmt, in welchem für die Brennelement-Lagerbeckenkühlung nur noch einer der drei Beckenkühlstränge verfügbar war.

Die generische Bedeutung dieses Ereignisses wurde im Jahresbericht 2022 - 2023 (April 2022 – März 2023) /GRS 23/ beschrieben.

Ereignis 2021/037, DWR, „Messwertabweichung an Füllstandsmessungen des Zusatzboriersystems bei Wiederkehrender Prüfung“:

Bei einer Wiederkehrenden Prüfung zeigten beide Füllstandsmessungen an einem Zusatzborierbehälter zu hohe Messwerte. Die Ursache der Messwertabweichungen lag in nicht entlüfteten Messleitungen. Die Entlüftung war nach Instandhaltungsarbeiten in der vorangegangenen Revision fälschlicherweise nicht durchgeführt worden.

Durch den vorliegenden Fehler wäre nach Einspeisung des Behälterinventars nicht automatisch auf Ansaugen aus den Flutbecken umgeschaltet worden. Zu dieser automatischen Anforderung kommt es beim auslösenden Ereignis „Dampferzeuger-Heizrohrbruch“. Für das Ereignis wurde unter Berücksichtigung der Ausfallzeit (55 Tage) eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände von $< 1 \cdot 10^{-10}$ berechnet.

Ereignis 2022/005, DWR, „Tropfleckage an einer Schweißnaht im gesicherten Zwischenkühlsystem nach erfolgter Druckprobe“:

Das Ereignis trat beim Nachbetrieb der Anlage auf. Bei einer Druckprüfung in einem Strang des gesicherten Zwischenkühlwassersystems für die Kühlung der Notstromdiesel kam es an einer Schweißnaht im Rohrleitungsabschnitt direkt unterhalb des Ausgleichsbehälters zu einer Tropfleckage. Die Ursache war Muldenkorrosion im Bereich einer Schweißnaht. Die daraufhin untersuchten vergleichbaren Rohrleitungsabschnitte der redundanten Zwischenkühlwasserstränge wiesen alle drei eine ähnliche Ausprägung von Muldenkorrosion auf. Die betroffenen Rohrleitungsabschnitte wurden ausgetauscht.

Aufgrund der Lage der Leckage wäre der Betrieb der Zwischenkühlwasserstränge im Anforderungsfall (Notstromfall) nicht beeinträchtigt gewesen. Jedoch standen die Zwischenkühlwasserstränge während der Reparaturarbeiten nicht zur Verfügung. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschadenzustände von $2,6 \cdot 10^{-8}$ berechnet.

Ereignis 2022/019, DWR, „Druckabfall an einer gesicherten Nebenkühlwasserpumpe“:

Während der Anlagenrevision kam es zum Ausfall einer gesicherten Nebenkühlwasserpumpe. Ursache war ein Abdeckblech, welches in das Saugrohr der Pumpe gefallen war. Das Abdeckblech wurde geborgen. Durch den Ausfall war auch der zugehörige Nachkühlstrang für die Kernkühlung nicht verfügbar. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände von $5,5 \cdot 10^{-8}$ berechnet.

Ereignis 2022/020, DWR, „Riss am Metallkompensator der Kraftstoffsaugleitung eines Notspeisenotstromdiesels“:

Das Ereignis trat beim Nachbetrieb der Anlage auf. Bei einer Wartung wurde am Metallkompensator der Kraftstoffsaugleitung eines Notspeisenotstromdieselmotors eine Kraftstoffleckage festgestellt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten Rissbildungen auf der gesamten Länge des Kompensators. Die Ursache war Spannungsrisskorrosion. Für die Precursor-Bewertung wurde angenommen, dass es innerhalb der Missionszeit des Diesels bei einem Notstromfall zu einer Vergrößerung des Risses oder zu weiteren Rissen gekommen wäre, was zu einer Beeinträchtigung des Dieselbetriebs geführt hätte.

Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschadenszustände von $1,2 \cdot 10^{-8}$ berechnet.

Ereignis 2022/027, DWR, „Ausfall eines Umluftventilators im Notspeisegebäude bei Wiederkehrender Prüfung“:

Das Ereignis trat beim Nachbetrieb der Anlage auf. Bei einer Prüfung wurde ein Umluftventilator im Notspeisegebäude durch seine Drehzahlüberwachung abgeschaltet. Die Ursache war ein Defekt des Drehzahlwächters. Diese Umluftventilatoren werden bei Betrieb des Notspeisenotstromdiesels angefordert. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschadenszustände von $1,3 \cdot 10^{-9}$ berechnet.

Ereignis 2022/030, DWR, „Ausfall einer Beckenkühlpumpe wegen Druck- und Durchsatzschwankungen“:

Die Anlage befand sich im Nachbetrieb. Beim Betrieb einer Beckenreinigungspumpe und einer Beckenkühlpumpe wurden Druck- und Durchsatzschwankungen festgestellt. Die Beckenkühlpumpe wurde daraufhin von Hand abgeschaltet. Dieser Beckenkühlstrang war damit ausgefallen. Bei der Fehlersuche wurde Luft in diesen Systemen festgestellt. Ein Tag später konnten nach statischen und dynamischen Entlüftungen zunächst die Lagerbeckenreinigung und anschließend die ausgefallenen Beckenkühlpumpe wieder in Betrieb genommen werden. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschadenszustände von $5,9 \cdot 10^{-7}$ berechnet.

Ereignis 2022/039, DWR, „Kleinstleckage am Gummikompensator eines Kühlwassersystems an einem Notstromdiesel“:

Die Anlage befand sich im Leistungsbetrieb. Bei einem Rundgang wurde an einem Notstromdiesel eine Kühlmittleckage festgestellt. Die Ursache war ein Materialdefekt an einem Gummikompensator. Die Leckage war so gering, dass es nicht zum Ansprechen von Meldungen kam. Eine Ausweitung der Leckage durch längere betriebliche Belastungen oder durch die Belastungen beim Auslegungsstörfall Erdbeben konnte jedoch nicht ausgeschlossen werden. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände von ca. $6 \cdot 10^{-9}$ berechnet.

Ereignis 2023/007, DWR, „Abweichung beim Maß zwischen Pleuelstange und Gegengewicht der Kurbelwelle an einem Notstromdieselaggregat“:

Die Anlage befand sich im Leistungsbetrieb. Bei einer Wartung wurden an einem Notstromdiesel Unterschreitungen des Mindestmaßes zwischen Pleuelstange und Gegengewicht der Kurbelwelle festgestellt. Die Fehlstellungen waren auf eine nicht ordnungsgemäße Ausrichtung der Gegengewichte im Rahmen der Montage im Jahr 2007 zurückzuführen. Durch den Motorenhersteller wurde ein Weiterbetrieb des Aggregates aufgrund der deutlichen Unterschreitung des rechnerisch ermittelten Mindestmaßes nicht empfohlen. Für das Ereignis wurde eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände von $4,1 \cdot 10^{-7}$ berechnet.

4.4 Probabilistisch nicht bewertete Ereignisse

Die vorausgewählten Ereignisse für den Zeitraum des Jahres 2021 und Januar 2022 bis April 2023 konnten alle probabilistisch bewertet werden.

4.5 Untersuchungen hinsichtlich der Weiterentwicklung von Methoden für die Precursor-Analyse

Im weiteren Sinne wird hier unter der Weiterentwicklung von Methoden auch die Anpassung von vorhandenen Methoden, Änderungen und Ergänzungen in den uns zur Verfügung stehenden PSA-Modellen sowie am Analyseumfang von PSA verstanden. Bei der Precursor-Bewertung der Ereignisse des Jahres 2021 ergab sich bei keinem der untersuchten Ereignisse ein Bedarf hinsichtlich der Weiterentwicklung von Methoden.

Bei einem der Ereignisse von Januar 2022 bis April 2023 wurde für die Precursor-Bewertung die vorhandene PSA der GRS für den Nachbetrieb um eine Reparaturmaßnahme erweitert.

Ereignis 2022/030, „Ausfall einer Beckenkühlpumpe wegen Druck- und Durchsatzschwankungen“:

Bei diesem Ereignis stand durch die geringe Nachzerfallsleistung ausreichend Karenzzeit (> 3 Tage) für die Reparatur des ausgefallenen Beckenkühlstranges zur Verfügung. Für die durchgeführten Reparaturmaßnahmen wurde gemäß PSA-Leitfaden /FAK 05/

Abschnitt E 2.2 eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1 (Reparaturmaßnahme der Kategorie „gut reparierbar“) verwendet. Die Reparaturmaßnahme wurde in den Ereignisbaum für das auslösenden Ereignis „Ausfall der BE-Lagerbeckenkühlung“ implementiert.

5 Ergebnisse der generischen Auswertung von Rückflüssen zu Weiterleitungsnachrichten

Die Ergebnisse der kontinuierlichen Auswertung von Betriebserfahrung können auch als Grundlage für die Erstellung von Weiterleitungsnachrichten (WLN) in einem anderen Vorhaben dienen (vgl. Kapitel 3). Die Betreiber von Kernkraftwerken und anderer kern-technischer Einrichtungen erstellen nach Erhalt einer WLN eine Stellungnahme für die jeweils zuständige atomrechtliche Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde des Landes hinsichtlich der Umsetzung der Empfehlungen aus der betroffenen WLN. Diese werden von den Ländern geprüft. Ob und wie die in den WLN gegebenen Empfehlungen in den Kernkraftwerken anlagenspezifisch umgesetzt wurden, wird der GRS im Auftrag des BMUV durch die Länder in Form von Erfahrungsrückflüssen mitgeteilt. Diese wurden von der GRS im Rahmen des Vorhabens 4724R01311 generisch ausgewertet. Dabei ist von Interesse, welche verschiedenen Lösungsansätze für die Umsetzung der Empfehlungen gewählt wurden und ob sich sicherheitstechnisch wichtige Erkenntnisse aus den Untersuchungen in den einzelnen Anlagen ergaben. Dies wird mit dem Ziel durchgeführt, anlagenübergreifende sicherheitstechnisch wichtige Erkenntnisse abzuleiten sowie die Kompetenz und Wissensbasis der GRS zu erweitern, z. B. hinsichtlich konkreter Umstände und Maßnahmen in einzelnen Anlagen. Die GRS wertet den von den Aufsichtsbehörden der Länder übermittelten Erfahrungsrückfluss in einem anderen Vorhaben im Auftrag des BMUV auch anlagenspezifisch aus. Ziel der Auswertung ist es, dem BMUV und den Aufsichtsbehörden der Länder einen Überblick über weitere Umsetzungsmöglichkeiten der Empfehlungen der WLN aus den verschiedenen Anlagen zu geben bzw. zusätzliche Erkenntnisse aus den Untersuchungen in den einzelnen Anlagen zu gewinnen, um ggf. ergänzende Maßnahmen bei einzelnen Anlagen veranlassen zu können. Neben den fachlichen Erkenntnissen dient der Erfahrungsrückfluss dazu, die Qualität der WLN zu verbessern. Die anlagenspezifischen sicherheitstechnisch wichtigen Erkenntnisse aus den Untersuchungen werden erfasst. Die Auswertung der WLN-Rückflüsse erschließt somit eine weitere Quelle für die umfassende Auswertung von Betriebserfahrung.

Im Berichtszeitraum wurde der Erfahrungsrückfluss zu den Weiterleitungsnachrichten des Jahres 2022 ausgewertet. Zu den vier Weiterleitungsnachrichten des Jahres 2022 lagen der GRS bis zum Auswertzeitpunkt 72 Rückmeldungen aus 22 Kernkraftwerksblöcken vor, außerdem 12 Rückflüsse aus drei Forschungsreaktoren sowie 17 Rückflüsse aus zehn Zwischenlagern.

In der Weiterleitungsnachricht 2022/01 /GRS 22/ wurden Empfehlungen zur Vermeidung des fehlerhaften Einbaus von programmierbaren Multifunktionsschutzgeräten gegeben. Die Auswertung des Rückflusses ergab, dass die Anlagen, welche programmierbare Multifunktionsschutzgeräte zur Absicherung sicherheitstechnisch wichtiger Systeme betreiben, diese geprüft haben. In allen Anlagen wurden Maßnahmen ergriffen bei zukünftigen Einbauten oder Modifikationen von bzw. an programmierbaren Multifunktionsschutzgeräten einen fehlerhaften Einbau im Sinne der WLN 2022/01 zu vermeiden.

Die Weiterleitungsnachricht 2016/14A /GRS 22/ diskutiert ein Ereignis, bei dem es im Rahmen einer Kurzschlussprüfung an Meldeprimärleitungen zu einer Verschiebung der Adresszuweisungen der Brandmelder gekommen ist. Von dieser Problematik betroffen sind Anlagen, bei denen in der Brandmeldeanlage eine bestimmte Baugruppe verbaut ist. Aus dem Rückfluss geht hervor, dass die Anlagen, bei denen diese Baugruppe verbaut ist, sichergestellt haben, dass keine Adressverschiebung durch vergangene und zukünftige Kurzschlussprüfungen auftreten.

Die Empfehlungen der Weiterleitungsnachricht 2022/02 /GRS 23/ dienen zur Vermeidung der Verwendung von falschem Messgas in der Strahlenschutzinstrumentierung. Die Anlagen legen im Rückfluss dar, wie Messgasflaschen und -flaschenbündel bei der Eingangskontrolle und nach dem Austausch geprüft werden.

In der Weiterleitungsnachricht 2022/03 /GRS 23/ wurden Empfehlungen ausgesprochen, um eine mögliche Nichtsignalisierung von Meldungen der Brandmeldezentrale auf dem übergeordneten GMA-Manager (Gefahrenmeldeanlagen-Manager) zu vermeiden. Dieses Phänomen kann auftreten, wenn in der Anlage sowohl ein bestimmter GMA-Manager in Kombination mit Brandmeldezentralen des gleichen Herstellers eingesetzt werden. Die Anlagen, welche diese Kombination verwenden, haben laut Rückfluss Maßnahmen getroffen, um eine Einschränkung des Brandschutzsystems im Sinne dieser WLN zu vermeiden. Alle Anlagen geben im Rückfluss an, dass im Betriebsreglement Vorgaben zum Umgang mit Störungen vorhanden sind.

Die Auswertung zeigte, dass die WLN-Empfehlungen im Wesentlichen und im Sinne der Intention der GRS hinter der jeweiligen Empfehlung umgesetzt wurden. In zwei Fällen konnte die Umsetzung der Empfehlung mangels Informationen durch die GRS nicht bewertet werden, da im Rückfluss angegeben wurde, dass die dargestellten Befunde und Empfehlungen für die Anlage nicht relevant sind bzw. kein Handlungsbedarf besteht, ohne dass eine Begründung dieser Einschätzung enthalten war.

6 Ergebnisse zusätzlicher weiterführender Arbeiten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zusätzlicher weiterführender Arbeiten im Zusammenhang mit der Auswertung von Betriebserfahrung aufgeführt, die der Ermittlung und Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik dienen und deren Ergebnisse nachfolgend zusammengefasst werden.

6.1 Festlegung des Prüfumfanges bei Verdacht auf systematische Schadensursache

Bei Auftreten von neuen Schadensphänomenen oder unerwartetem gehäuftem Auftreten bekannter Schadensphänomene in kerntechnischen Anlagen ist zu untersuchen, ob eine systematische Schadensursache vorhanden ist und diese auch in anderen gleichartigen oder ähnlichen Einrichtungen vorliegt.

Insbesondere wenn eine große Anzahl solcher Einrichtungen (z. B. Schalter, Lagerschalen, Dübel, Dioden, Magnete, Kondensatoren oder Leittechnikbaugruppen) vorhanden ist, wären vollständige Prüfungen aller Einrichtungen aufwendig. Hier wird häufig nur die Prüfung einer Stichprobe vorgesehen. Bisher gibt es aber keine nachvollziehbare Vorgehensweise, um den hierfür erforderlichen Prüfumfang quantitativ festzulegen.

Deshalb wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Verfahren zur nachvollziehbaren Ermittlung des erforderlichen Prüfumfanges entwickelt und beispielhaft erprobt, um bei einem Verdacht auf systematische Schadensursache eine unzulässige Nichtverfügbarkeit von Einrichtungen aufgrund systematischer Fehler mit ausreichender Aussageicherheit ausschließen zu können.

Unter der Annahme eines voneinander unabhängigen Ausfalls der vom systematischen Fehler betroffenen Einzelkomponenten eines Systems wurde basierend auf die bayessche Wahrscheinlichkeitsrechnung und unter Nutzung einer nichtinformativen A-priori-Verteilung nach Jeffreys /BOX 73/ eine Gleichung zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer unzulässigen Nichtverfügbarkeit eines Systems in Abhängigkeit des Prüfumfanges einer Stichprobe und der Wahrscheinlichkeit des Ausfalls einer Einzelkomponente hergeleitet. Diese Gleichung wurde zunächst durch Anwendung der

Minimalschnittapproximation¹ näherungsweise ausgewertet. Die Minimalschnittnäherung lässt sich für kleine Werte der Ausfallwahrscheinlichkeit der Einzelkomponenten des betrachteten Systems sehr gut anwenden.

Um den Einfluss der approximativen Berechnungen durch Verwendung von Minimalschnitten auf das Gesamtergebnis, d. h. auf die Wahrscheinlichkeit eines unzulässigen Ausfalls des Gesamtsystems, abschätzen zu können, wurde dann eine exakte Berechnungsmethode entwickelt und implementiert, die numerische Ergebnisse für die Ausfallwahrscheinlichkeiten eines Systems in beliebiger Genauigkeit ermöglicht, indem bei der Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten alle möglichen Ausfallkombinationen des Systems mit ihren jeweiligen Auftretswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden.

Darauf aufbauend wurde die Anzahl der notwendigen Prüfungen von Einrichtungen zur Unterschreitung eines Zielwerts für die Wahrscheinlichkeit einer Unverfügbarkeit des vom systematischen Fehler betroffenen Systems abgeleitet.

Bei der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines unzulässigen Ausfalls eines Systems wurde das System als ein aus mehreren Einzeleinheiten bestehendes Gesamtsystem betrachtet. Die Unterteilung des Gesamtsystems in Einzeleinheiten erfolgt im Hinblick auf die mit dem System realisierten Funktionen (Systemfunktionen). D. h., eine Einzeleinheit umfasst die Einrichtungen zur Realisierung einer bestimmten Funktion des Gesamtsystems, während das Gesamtsystem die Einrichtungen zur Realisierung der Gesamtheit der Systemfunktionen umfasst. Das Gesamtsystem ist genau dann verfügbar, wenn alle Einzeleinheiten verfügbar sind. In Minimalschnittnäherung kann dann die Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems einfach bestimmt werden, da die Minimalschnitte des Gesamtsystems die Vereinigungsmenge der Minimalschnitte der Einzeleinheiten ist und somit die Summe der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Einzeleinheiten die Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems ergibt. Für die exakte Rechnung wurde ein iterativer Algorithmus entwickelt und implementiert, der die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems mit beliebiger Genauigkeit erlaubt.

Das Verfahren wurde anschließend am Beispiel eines meldepflichtigen Ereignisses erprobt, bei dem eine im Reaktorschutzsystem einer DWR-Anlage mehrfach eingebaute

¹ Bei der Minimalschnittnäherung wird die Nichtverfügbarkeit des Systems als Summe der Wahrscheinlichkeiten von Minimalschnitten – dies sind minimale Mengen von Einrichtungen, deren Ausfall zum unzulässigen Ausfall des Systems führen – approximativ berechnet.

Baugruppe von einem neuartigen, nichtselbstmeldenden Fehler betroffen war. Hierbei wurde eine Ausfallanalyse der betroffenen Leittechnikfunktionen durchgeführt, um den Einfluss des Ausfalls der betroffenen Baugruppen auf den notwendigen Prüfumfang zu analysieren. Bei dieser Ausfallanalyse wurden hierzu vorliegende Schaltanordnungen der betroffenen Baugruppen sowie das Ausfallverhalten anderer vorhandener Baugruppen in den betreffenden Auslösepfaden des Reaktorschutzsystems berücksichtigt. Weiterhin wurden die gemäß KTA 3501 zusätzlich die zum zugrunde gelegten systematischen Fehler der betroffenen Baugruppen zu betrachtenden Ausfallkombinationen (Instandhaltungsfall, Zufallsausfall) im Reaktorschutzsystem weiter spezifiziert.

Für die Durchführung der Ausfallanalyse im Rahmen der Erprobung des Verfahrens wurden die Auslösepfade des Reaktorschutzsystems mit den betroffenen Baugruppen ermittelt und den verschiedenen Schutzaktionen des Reaktorschutzsystems zugeordnet. Hierbei wurden die verschiedenen Schaltanordnungen der in den betreffenden Auslösepfaden befindlichen in Frage stehenden Baugruppen betrachtet. Die vom Reaktorschutzsystem ausgelösten Schutzaktionen zur Beherrschung von Ereignissen auf der Sicherheitsebene 3 wurden entsprechend der vorliegenden Schaltanordnungen der betroffenen Baugruppen zur Bildung des Auslösesignals und den hierzu realisierten Leittechnikfunktionen zunächst in sechs Kategorien gegliedert, die durch die zugrundeliegende Schaltanordnungen der Baugruppen zur Realisierung der Leittechnikfunktionen sowie die Verfügbarkeitsanforderungen an die auszulösenden Schutzaktionen definiert sind. Die genannten Schutzaktionen wurden dann für jede Kategorie hinsichtlich eines unzulässigen Ausfalls der entsprechenden Leittechnikfunktionen aufgrund von Ausfällen der betroffenen Baugruppen analysiert.

Darauf aufbauend wurden die Wahrscheinlichkeiten für unzulässige Ausfälle der entsprechenden Leittechnikfunktionen für jede Kategorie berechnet. Anschließend wurde die Gesamtwahrscheinlichkeit eines unzulässigen Ausfalls des Reaktorschutzsystems durch systematischen Ausfall der betroffenen Baugruppen unter den angenommenen Randbedingungen für die zu betrachtenden Fälle berechnet.

Es wurden jeweils Berechnungen in Minimalchnittnäherung und exakte Berechnungen durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Basierend auf diesen Berechnungen wurde die erforderliche Prüfmenge von Baugruppen zur Unterschreitung des Zielwerts von 10^{-4} für die Wahrscheinlichkeit einer Unverfügbarkeit des vom systematischen Fehler betroffenen Systems bestimmt.

Beim Vergleich der mit Minimalschnittapproximation berechneten Ausfallwahrscheinlichkeiten mit dem exakten Berechnungsverfahren ermittelten Ausfallwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Prüfmenge ergibt sich, dass die Unterschiede zwischen der Minimalschnittapproximation und dem exakten Berechnungsverfahren bei der Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten nur bei großer Prüfmenge klein sind. Abhängig vom betrachteten Szenario für die Durchführung der Prüfungen an den fraglichen Baugruppen lag der Unterschied für das hier betrachtete Anwendungsbeispiel bei 42 geprüften Baugruppen maximal bei 28,6 % und bei 420 geprüften Baugruppen maximal bei 0,96 %.

Die Gesamtwahrscheinlichkeit einer unzulässigen Unverfügbarkeit des Reaktorschutzsystems nimmt zwar mit größer werdender Anzahl an geprüften Redundanten und Baugruppen sowie Anzahl an betrachteten Anlagen ab; um jedoch eine ausreichend niedrige Wahrscheinlichkeit eines unzulässigen Ausfalls des Reaktorschutzsystems, d. h. $p_G \leq 10^{-4}$, sicherzustellen, müssten unter Berücksichtigung eines möglichen Zufallsausfalls nach KTA 3501 beim untersuchten Anwendungsbeispiel $M=30.024$ Baugruppen erfolgreich getestet werden, wenn in der betrachteten Anlage keine Redundante vollständig getestet wurde. Bei vollständigem Testen einer bzw. zweier Redundanten ergeben sich mit $M=30.010$ bzw. $M=20.004$ Baugruppen ebenfalls sehr hohe Werte. Die Anzahl der zu testenden Baugruppen wäre somit unrealistisch groß. Bei Berücksichtigung eines möglichen Zufallsausfalls nach KTA 3501 ist das vollständige Testen einer Redundante bzw. zweier Redundanten somit keine sinnvolle Prüfstrategie.

Deshalb wurde eine andere, geeignetere Prüfstrategie entwickelt. Grundlage ist, dass Leittechnikfunktionen verschiedener Kategorien in unterschiedlichem Ausmaß zur Gesamtausfallwahrscheinlichkeit beitragen. Bei dem betrachteten Anwendungsbeispiel dominieren Beiträge von fünf Kategorien die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit. Dies liegt daran, dass bei diesen Kategorien aufgrund der Verfügbarkeitsanforderungen an die auszulösenden Schutzaktionen der Ausfall von zwei Signalen bereits zu einer unzulässigen Unverfügbarkeit des Reaktorschutzsystems führen kann. Tritt bei Schutzaktionen dieser Kategorien ein Zufallsausfall zusätzlich zu einem Ausfall aus systematischer Ursache der betroffenen Baugruppe auf, kann es zu einem unzulässigen Ausfall des Reaktorschutzsystems kommen. Im Gegensatz dazu führt bei Schutzaktionen der anderen Kategorie erst der Ausfall von drei Signalen, z. B. zwei Ausfällen aus systematischer Ursache und einem Zufallsausfall, zu einer unzulässigen Unverfügbarkeit des Reaktor-

schutzsystems. Dies verdeutlicht den Einfluss der realitätsnahen Modellierung der leittechnischen Realisierung der jeweiligen Schutzaktionen unter Berücksichtigung deren Verfügbarkeitsanforderungen auf das Gesamtergebnis.

Die entwickelte Prüfstrategie besteht nun darin, dass zunächst Baugruppen des betreffenden Typs geprüft werden, die zur Realisierung derjenigen Leittechnikfunktionen des Reaktorschutzsystems dienen, die einen hohen Beitrag zur Gesamtwahrscheinlichkeit einer unzulässigen Beeinträchtigung des Reaktorschutzsystems liefern, so dass ein Ausfall dieser Leittechnikfunktionen durch den systematischen Fehler nicht mehr zu befürchten ist. Dies umfasst beim untersuchten Anwendungsbeispiel 51 der in der Anlage im Reaktorschutzsystem zur Auslösung der Schutzaktionen eingesetzten Baugruppen des betroffenen Typs. Um unter dieser Voraussetzung eine niedrige Wahrscheinlichkeit eines unzulässigen Ausfalls des Reaktorschutzsystems, d. h. $p_G \leq 10^{-4}$, sicherzustellen, sind bei dem hier betrachteten Anwendungsbeispiel insgesamt 175 fehlerfrei getestete Baugruppen erforderlich. Dies ist größer als die Anzahl der insgesamt in der Anlage zum Auslösen der Schutzsignale eingesetzten Baugruppen (166); insofern ist die Anwendung dieser Vorgehensweise nur dann sinnvoll, wenn die Prüfungen auch weitere Baugruppen, z. B. lagerhaltige Baugruppen oder Baugruppen aus anderen Anlagen umfassen. Wenn entsprechende Prüfungen von 51 Baugruppen in drei weiteren Anlagen durchgeführt werden, wird mit dann insgesamt 204 geprüften Baugruppen die erforderliche Anzahl von 175 bereits deutlich übertroffen. Somit ist das hier beschriebene Verfahren für Anwendungsfälle geeignet, in denen eine ausreichend große Anzahl von gleichartigen Einrichtungen vorhanden ist, typischerweise in mehreren Anlagen, z. B. bei mehreren identischen Anlagen einer Baulinie.

Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte Verfahren kann immer dann sinnvoll angewendet werden, wenn eine große Anzahl von Einrichtungen vorhanden ist, die potenziell von einer systematischen Ausfallursache betroffen sein können und eine vollständige Prüfung aller dieser Einrichtungen vermieden werden soll. Hieraus ergeben sich mögliche Anwendungen insbesondere für leittechnische Einrichtungen wie Leittechnikbaugruppen, aber auch elektrotechnische, maschinentechnische oder bautechnische Einrichtungen wie z. B. Schalter, Vorsteuerventile oder Brandschutzklappen.

Im Rahmen der Betriebserfahrungsauswertung kann das entwickelte Verfahren angewandt werden, um bei Verdacht auf eine systematische Ereignisursache z. B. aufgrund des Auftretens von neuen Schadensphänomenen oder unerwarteten gehäuften Auftre-

tens bekannter Schadensphänomene den Umfang von Untersuchungen quantitativ festzulegen bzw. zu bewerten. Die GRS sieht hier eine Relevanz, ggf. entsprechende Empfehlungen in zukünftigen Weiterleitungsnachrichten abzuleiten.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus dem entwickelten Verfahren und seiner Anwendung am Beispiel eines meldepflichtigen Ereignisses ist zusammenfassend festzuhalten, dass eine Prüfstrategie auf das zu betrachtende System abgestimmt werden muss. Hierbei sind Systemaufbau und -auslegung sowie die Verfügbarkeitsanforderungen des Systems im Detail zu berücksichtigen. Um bei hoher Aussagesicherheit einen möglichst geringen Prüfumfang zu erreichen, sollten diejenigen Systembestandteile geprüft werden, die den größten Beitrag zur Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems liefern. Hierzu wird das betrachtete Gesamtsystem in Einzelsysteme strukturiert, wie es für Einrichtungen des Sicherheitssystems typischerweise möglich ist. Dabei können zur Vereinfachung der Analyse ggf. Kategorien von Einzelsystemen definiert werden, die gleiche Anordnungen zur Realisierung der Systemfunktionen sowie gleiche Verfügbarkeitsanforderungen aufweisen und somit jeweils gleich stark zur Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems beitragen.

Grundsätzlich ist der entwickelte Ansatz aber auch dann geeignet, wenn die Strukturierung in Einzelsysteme nicht möglich ist. Dann muss das Gesamtsystem zur Identifizierung der Systembestandteile, die die größten Beiträge zur Ausfallwahrscheinlichkeit liefern, betrachtet werden. Um hierzu eine konkrete Vorgehensweise zu entwickeln, wären weitere Forschungsarbeiten anhand eines entsprechenden Beispielsystems erforderlich. Eine Weiterentwicklung ist auch für Fälle möglich, in denen die Anzahl der Einrichtungen, die potenziell von einer systematischen Ausfallursache betroffen sein können, für die Anwendung des hier entwickelten Verfahrens nicht ausreichend groß ist: Dann ist die Menge der zu testenden Einrichtungen iterativ jeweils um diejenige Einrichtung zu erweitern, die den größten Beitrag zur Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems liefert, bis der Zielwert erreicht oder unterschritten wird. Dieser Ansatz könnte ebenfalls im Rahmen eventueller weiterer Forschungsvorhaben konkret ausgearbeitet und anhand eines Beispielsystems erprobt werden.

7 Zusammenfassung

Die kontinuierliche Auswertung von Erfahrungen und Informationen im Rahmen des ingenieurtechnischen Screenings führte zur Erkennung verschiedener sicherheitsrelevanter Aspekte, bezüglich derer ereignis- bzw. anlagenübergreifende vertiefte Untersuchungen durchgeführt wurden. Thematischer Schwerpunkt war insbesondere die Anlagen- und Systemtechnik sowie die E- und Leittechnik. In vielen Fällen waren aber auch Aspekte weiterer Fachgebiete betroffen, zudem waren in verschiedenen Fällen menschliche oder organisatorische Einflussfaktoren mitwirkend. Bei Bedarf wurden basierend auf den hier gewonnenen Erkenntnissen entsprechend der sicherheitstechnischen Bedeutung und der Übertragbarkeit auf andere Anlagen von der GRS im Rahmen eines anderen Vorhabens Weiterleitungsnachrichten mit diesbezüglichen Empfehlungen erstellt. Im Berichtszeitraum wurden auf Basis der in diesem Vorhaben durchgeführten vertieften Untersuchungen zu sicherheitsrelevanten Aspekten insgesamt zwei Weiterleitungsnachrichten durch die GRS erstellt.

Insgesamt zwölf Ereignisse des Jahres 2021 und des Zeitraums Januar 2022 bis April 2023 wurden im Rahmen der Precursor-Analysen ausgewählt und probabilistisch bewertet. Von der GRS werden alle Ereignisse für welche die bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände aufgrund des Ereignisses $\geq 10^{-6}$ beträgt als Precursor eingestuft. Für keines der bewerteten Ereignisse ergab sich eine bedingte Wahrscheinlichkeit für Gefährdungszustände von $\geq 10^{-6}$. Somit ist keines der quantitativ bewerteten Ereignisse als Precursor einzustufen.

Zu einzelnen Themen, die sich im Zusammenhang mit der Auswertung von Betriebserfahrung ergaben, wurden zusätzliche weiterführende Arbeiten durchgeführt, die der Ermittlung und Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik dienen.

In einer weiteren Studie hat die GRS ein Verfahren zur nachvollziehbaren Ermittlung des erforderlichen Prüfumfanges entwickelt und beispielhaft erprobt, um bei einem Verdacht auf systematische Schadensursache eine unzulässige Nichtverfügbarkeit von Einrichtungen aufgrund systematischer Fehler mit ausreichender Aussagesicherheit ausschließen zu können. Als mathematische Grundlage wird dabei die bayessche Wahrscheinlichkeitsrechnung unter Nutzung einer nichtinformativen A-priori-Verteilung nach Jeffreys /BOX 73/ verwendet, um das Ausfallverhalten der Komponenten zu beschreiben.

Die GRS stellt im Rahmen der beispielhaften Erprobung des entwickelten Verfahrens anhand eines meldepflichtigen Ereignisses abschließend fest, dass unter Berücksichtigung der im Vorhaben genutzten mathematischen Modelle das Prüfen von Baugruppen in ein oder zwei Redundanzen des Reaktorschutzsystems nicht geeignet ist, um das Vorliegen einer unzulässigen Beeinträchtigung des Reaktorschutzsystems aus systematischer Ursache mit ausreichend hoher Zuverlässigkeit (Gesamtausfallwahrscheinlichkeit $< 10^{-4}$) auszuschließen. Eine geeignete Prüfstrategie kann vielmehr darin liegen, Baugruppen so zu testen, dass eine Unverfügbarkeit derjenigen Schutzaktionen nicht mehr zu befürchten ist, die besonders stark zur Gesamtausfallwahrscheinlichkeit beitragen. Zur Ermittlung dieser Baugruppen ist eine detaillierte Analyse des Gesamtsystems erforderlich. Wenn entsprechende Prüfungen in mehreren Anlagen befundfrei durchgeführt werden, kann mit vertretbarem Aufwand nachgewiesen werden, dass mit hoher Zuverlässigkeit keine unzulässige Beeinträchtigung des Reaktorschutzsystems aus fraglicher systematischer Ausfallursache der betroffenen Baugruppen vorliegt.

Durch die Auswertungen und Untersuchungen nationaler und internationaler Vorkommnisse sowie durch die zugehörige GRS-interne Dokumentation und Datenbankerfassung wurde insgesamt die Wissensbasis der GRS zu sicherheitstechnisch relevanten Erkenntnissen aus der Betriebserfahrung erweitert.

Literaturverzeichnis

- /BOX 73/ Box, G. E. P., E. G. Tiao: Bayesian Inference in Statistical Analysis, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA, 1973.
- /FAK 05/ Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, BfS-SCHR-37/05, Salzgitter, Oktober 2005.
- /FAK 15/ Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden und Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: Mai 2015, BfS-SCHR-61/16, Salzgitter, September 2016.
- /GRS 14/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Methoden zur probabilistischen Bewertung von betrieblichen Ereignissen (Precursor-Analysen), GRS-A-3686 (Teil III), Köln, Januar 2014.
- /GRS 22/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Vertiefte Untersuchungen von Betriebserfahrungen aus Kernreaktoren, Jahresbericht 2021-2022, GRS-680, Köln, April 2022.
- /GRS 23/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Vertiefte Untersuchungen von Betriebserfahrungen aus Kernreaktoren, Jahresbericht 2022-2023, GRS-720, Köln, April 2023.
- /IAEA 18/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Safety Standards Series No. SSG-50: "Operating Experience Feedback for Nuclear Installations", Specific Safety Guide, IAEA, Wien, 2018.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Informationsfluss bei der Auswertung nationaler und internationaler Betriebserfahrung	6
Abb. 2.2	Überblick zur Auswertung von Betriebserfahrung (die grau hinterlegten Arbeiten sind nicht Gegenstand des Vorhabens 4724R01311).....	10

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Vorausgewählte Ereignisse des Jahres 2021 und Ergebnisse der probabilistischen Bewertungen	19
Tab. 4.2	Vorausgewählte Ereignisse für den Zeitraum von Januar 2022 bis April 2023 und Ergebnisse der probabilistischen Bewertungen.....	20

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de