

**Entwicklung von Methoden
zur Berücksichtigung
übergreifender GVA
in der PSA**

Entwicklung von Methoden zur Berücksichtigung übergreifender GVA in der PSA

Jan Christopher Stiller
Moritz Leberecht
Albert Kreuser

Juli 2017

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Kennzeichen RS1541 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.

Deskriptoren

GVA, Quantifizierung, PSA, X-CCF, Übergreifender Gemeinsam Verursachter Ausfall

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein Verfahren erarbeitet, wie Zuverlässigkeitskenngrößen für komponentengruppenübergreifende GVA aus der bestehenden Betriebserfahrung ermittelt werden können.

Hierzu wurde zunächst eine Vorgehensweise zur Ermittlung von verallgemeinerten Komponentengruppen, für die GVA oder komponentengruppenübergreifende GVA modelliert werden, erarbeitet. Es wurden verschiedene Modelle entwickelt, um Ereignisse verallgemeinerten Komponentengruppen zuzuordnen. Da sofern möglich auf bereits bestehende Ereignisbewertungen durch Experten zurückgegriffen werden sollte, wurde ein Verfahren erarbeitet, wie bestehende Expertenbewertungen und sonstige Eingangsgrößen des GRS-Kopplungsmodells anzupassen sind, wenn das zugehörige GVA-Ereignis als komponentengruppenübergreifend eingestuft wird.

Unter Verwendung des GRS-Kopplungsmodells, den GVA-Daten der deutschen Betriebserfahrung und den obig erwähnten Methoden wurden Zuverlässigkeitskenngrößen für komponentengruppenübergreifende Ausfälle zwischen Notstrom- und Notspeisenotstromdieseln berechnet. Die Ergebnisse zeigten erstens, dass eine detailliertere Modellierung geeignet ist um unerwünschte Konservativitäten abzubauen und zweitens dass das Kopplungsmodell im Vergleich zu anderen Modellen keine überproportional konservativen Werte errechnet.

Für die Modellierung von komponentengruppenübergreifenden GVA, die eine große Anzahl von Komponenten betreffen, wurde eine Vorgehensweise entwickelt und an einfachen Beispielen erprobt, bei der während der Quantifizierung der Minimalschnitte zusätzliche Minimalschnitte ergänzt werden, durch die komponentengruppenübergreifende GVA berücksichtigt werden können. Es wurde ein Algorithmus entwickelt mit dem sich durch das Vernachlässigen von Ausfallkombinationen von geringem statistischem Gewicht der mathematische Aufwand bei der Ergänzung der Minimalschnitte in Grenzen hält.

Abstract

In the frame of this research project, a method to quantify common cause failures exceeding present common cause failure (CCF) groups using existing operating experience has been developed. For this purpose, a procedure for the determination of generalized component groups, for which CCF and common cause failures exceeding present CCF groups (X-CCF) are modelled, has been researched. Different models to map events to generalized component groups have been developed. To use existing expert assessments as far as possible, a procedure has been developed to adapt existing expert assessments and other input variables of the GRS coupling model for events classified as X-CCF.

Using the GRS coupling model, the CCF data of the German operating experience, and the above-mentioned methods, reliability parameters have been calculated for X-CCF affecting the emergency diesel generators and the additional backup diesel generators of the backup emergency power supply system. The results show that firstly the models developed are appropriate to reduce unwanted conservativeness and secondly that the application of the GRS coupling model does not generally lead to more conservative results than alternative CCF models like e. g. the alpha factor model.

A novel approach for the modeling of X-CCF affecting a large number of components has been developed and tested using simple examples. This approach consists of supplementing the list of minimal cut sets with additional elements representing minimal cuts including X-CCF. An approximate quantification algorithm which minimizes the numerical effort by disregarding minimal cuts with low statistical weight has also been developed and tested.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
1	Einleitung und Überblick.....	1
2	Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung der übergreifenden GVA aus der Betriebserfahrung und Durchführung einer Beispielquantifizierung.....	3
2.1	Vorüberlegungen zum Vorgehen	3
2.2	Beschreibung des Ansatzes zur Quantifizierung von komponentengruppenübergreifenden GVA.....	3
2.3	Bildung verallgemeinerter Komponentengruppen	5
2.4	Zuordnung von GVA-Ereignissen zu Komponentengruppen.....	7
2.5	Methode zur Ableitung von Expertenbewertungen für komponentengruppenübergreifende GVA-Ereignisse	13
2.6	Notwendige Modifikationen an Eingangsgrößen für das Kopplungsmodell	16
2.6.1	Anpassung der Beobachtungszeiten.....	16
2.6.2	Anpassung der Fehlerentdeckungszeit.....	19
2.6.3	Anpassung des Übertragbarkeitsfaktors	20
2.7	Grenzen des Verfahrens.....	21
2.8	Beispielhafte Quantifizierung eines komponentengruppenübergreifenden Ausfalls der Notstromdiesel unter Verwendung des Kopplungsmodells	22
2.8.1	Bestimmung der Beobachtungszeiten.....	23
2.8.2	Auswertung der Betriebserfahrung	24
2.8.3	Berechnung und Ergebnisse.....	31
2.9	Vergleich Kopplungsmodell – Alternative Modelle.....	45
2.9.1	Basic-Parameter-Modell	46
2.9.2	Alpha-Faktor-Modell	46
2.9.3	Ergebnisse des Modellvergleichs.....	47

3	Entwicklung einer Modellierungsmethode für übergreifende GVA, die sehr viele Komponenten betreffen können.....	49
3.1	Motivation	49
3.2	Erster Ansatz	49
3.2.1	Beispielhafte Anwendung des ersten Ansatzes	52
3.3	Weiterentwickelter Ansatz: Ergänzung der Minimalschnittmenge	58
3.3.1	Ergänzung aller X-Minimalschnitte.....	60
3.3.2	Ergänzung ausgewählter repräsentativer X-Minimalschnitte	62
3.4	Allgemeine Vorgehensweise.....	64
3.4.1	Beispiel C	66
3.4.2	Beispiel D	67
3.5	Quantifizierung von RX-Minimalschnitten	71
3.5.1	Erprobung des Verfahrens.....	74
3.6	Umgang mit Abschneidekriterien	76
3.7	Berücksichtigung der Unsicherheiten.....	78
4	Zusammenfassung und Ausblick.....	80
	Literaturverzeichnis.....	83
	Abbildungsverzeichnis.....	87
	Tabellenverzeichnis.....	89

1 Einleitung und Überblick

Die Sicherheit von Kernkraftwerken kann durch Ereignisse erheblich beeinflusst werden, bei denen aufgrund einer gemeinsamen Ursache Nicht-Verfügbarkeiten von mehreren Komponenten auftreten. Solche Ereignisse werden als gemeinsam verursachte Ausfälle (GVA) bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeiten für Ausfälle von Systemfunktionen (z. B. zur Notkühlung, zur Notstromversorgung oder zur Frischdampfabgabe) werden überwiegend durch die Wahrscheinlichkeiten von GVA dominiert. Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) moderner Kraftwerke haben gezeigt, dass insbesondere bei höher redundanten Systemen die Häufigkeit von Kernschadens- bzw. Gefährdungszuständen wesentlich durch GVA bestimmt werden, obwohl GVA-Ereignisse in der Betriebserfahrung relativ selten auftreten.

In der PSA werden GVA üblicherweise für die redundanten Komponenten einer Komponententart eines Systems unterstellt, z. B. bei der Notstromversorgung von modernen deutschen Druckwasserreaktoren einmal die vier Notstromdiesel des D1-Netzes und getrennt davon die vier Notstandsnotstromdiesel des D2-Netzes. Ein gemeinsamer Ausfall aller acht Diesel aufgrund gemeinsamer Ursache wird jedoch nicht unterstellt. Die Betriebserfahrung hat jedoch gezeigt, dass auch system- und komponentenartübergreifende GVA auftreten. Insbesondere können GVA-Phänomene auftreten, die sehr viele Komponenten betreffen, z. B. da die Komponenten gleiche oder gleichartige Betriebsmittel beinhalten. Solche gleichartige Betriebsmittel sind etwa elektrische Schalter, die einmal Teile von aktiven Komponenten (z. B. Pumpen oder Ventilatoren) sind, aber auch als Kuppelschalter zwischen verschiedenen elektrischen Versorgungsschienen Verwendung finden. Ein im Rahmen des BMWI-Vorhabens RS1198 durchgeführtes Screening /LEB 15/ hat ergeben, dass bis zu 30 Komponenten von einem solchen GVA betroffen sein können.

Zur Modellierung solcher übergreifender GVA steht zurzeit allerdings keine Methode zur Verfügung, obwohl solche GVA prinzipiell einen großen Einfluss auf die PSA-Ergebnisse haben können, wie z. B. die Arbeiten im Rahmen des BMWI-Vorhabens RS1198 gezeigt haben /LEB 15/. Auch international wird der Einfluss übergreifender GVA und deren Modellierung in der PSA intensiv diskutiert /VIV 08/, /GAL 11/, /CON 14/, /CON 14a/.

Deshalb wurde im Rahmen dieses Vorhabens RS 1541 begonnen, Methoden zur quantitativen Berücksichtigung von komponentengruppenübergreifenden GVA zu ent-

wickeln, um so den quantitativen Einfluss der Modellierung von komponentengruppen-
übergreifenden GVA auf das PSA-Ergebnis bestimmen und damit ihre probabilistische
Bedeutung bestimmen zu können.

Hierzu wurden zwei grundsätzliche Arbeitsziele verfolgt:

1. Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung der übergreifenden GVA aus der
Betriebserfahrung und Durchführung einer Beispielquantifizierung
2. Entwicklung einer Modellierungsmethode für übergreifende GVA, die sehr viele
Komponenten betreffen können

Die Mittel wurden in zwei Stufen vergeben. Zunächst für Arbeitsziel 1, dann nach Ab-
schluss dieser Arbeiten für Arbeitsziel 2. Deshalb wurden die Arbeiten zur Entwicklung
einer Methode zur Quantifizierung der übergreifenden GVA aus der Betriebserfahrung
und die Durchführung einer Beispielquantifizierung als erstes durchgeführt.

Da zu diesem Zeitpunkt keine Modellierungsmethode für übergreifende GVA, die sehr
viele Komponenten betreffen können, vorlag, wurden für die Beispielquantifizierungen
das Beispiel der Notstromdiesel (D1) und Notstandnotstromdiesel (D2) eines moder-
nen deutschen DWR gewählt. Die bisherigen Modellierungsmethoden sind für diese
Anzahl Komponenten (8) noch geeignet. Die Vorgehensweise und die Quantifizie-
rungsergebnisse sowie die Auswirkung auf das PSA-Ergebnis sind in Kapitel 2 darge-
stellt.

Die Arbeiten zur Entwicklung einer Modellierungsmethode für übergreifende GVA, die
sehr viele Komponenten betreffen können, sind in Kapitel 3 erläutert.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

2 Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung der übergreifenden GVA aus der Betriebserfahrung und Durchführung einer Beispielquantifizierung

2.1 Vorüberlegungen zum Vorgehen

Im /LEB 15/ wurden zwei verschiedene Ansätze vorgestellt um komponentengruppenübergreifende Ausfälle (ÜGVA) zu quantifizieren:

Der erste Ansatz umfasst die Bildung von verallgemeinerten Komponentengruppen, eine entsprechende Zuordnung von Ereignissen der Betriebserfahrung und die Bestimmung zusätzlicher Parameter, um die Wahrscheinlichkeit komponentengruppenübergreifender Ausfälle zu quantifizieren, wobei auch teilweise bereits bestehende Parameter angepasst werden müssen.

Der zweite Ansatz bildet die übergreifenden GVA nicht in der PSA-Modellierung ab; stattdessen wird die Quantifizierung von Ereignisabläufen in der PSA-Rechnung modifiziert. Der übergreifende GVA wird dabei als statistische Korrelation von mehreren GVA-Ausfällen oder Einzelfehlern in verschiedenen Komponentengruppen interpretiert. Minimalschnitte, die mehrere Ausfälle an Komponenten enthalten, die an Hand der Betriebserfahrung als für übergreifenden GVA anfällig identifiziert wurden, werden mit einer modifizierten Eintrittshäufigkeit weiterverarbeitet. Der Faktor um den sich die Eintrittshäufigkeit ändert, wird aus der Betriebserfahrung bestimmt.

Der zweite Ansatz kann zur Beispielquantifizierung nicht herangezogen werden, da er zunächst umfassendere Untersuchungen zu den Verfahren zur Bestimmung von Minimalschnitten voraussetzt. Im folgenden Kapitel wird daher der erste Ansatz aus /LEB 15/ verfolgt, um eine systematisch anwendbare Methode zur Quantifizierung von übergreifenden GVA aus der Betriebserfahrung zu erarbeiten.

2.2 Beschreibung des Ansatzes zur Quantifizierung von komponentengruppenübergreifenden GVA

Grundlage dieses Ansatzes zur Berücksichtigung von übergreifenden GVA in der GVA-Modellierung ist es, die feste Zugehörigkeit von Komponenten zu einer Komponentengruppe aufzuheben, von der bisher bei der Modellierung von GVA Gebrauch gemacht wurde. Stattdessen ist die Zugehörigkeit zu einer Gruppe von Komponenten im Rah-

men der GVA-Betrachtung phänomenabhängig. Das heißt, alle Komponenten, die durch ein bestimmtes GVA-Phänomen gleichzeitig unverfügbar sein können, gehören einer zu diesem Phänomen gehörenden Gruppe von Komponenten an (vgl. Abb. 2.1). Es ist möglich, dass mehrere Phänomene derselben Gruppe zugeordnet werden, wenn die von diesen Phänomenen ausgelösten GVA dieselben Komponenten betreffen können. Diese Gruppen sollen im Folgenden als verallgemeinerte Komponentengruppen bezeichnet werden.

Die Anzahl der verallgemeinerten Komponentengruppen und die zu einer einzelnen verallgemeinerten Komponentengruppe zugehörigen Komponenten können an Hand einer Auswertung der Betriebserfahrung oder basierend auf grundsätzlichen technischen Überlegungen (gleiche Komponente und gleiche Betriebsbedingungen, daher anfällig für GVA) bestimmt werden.

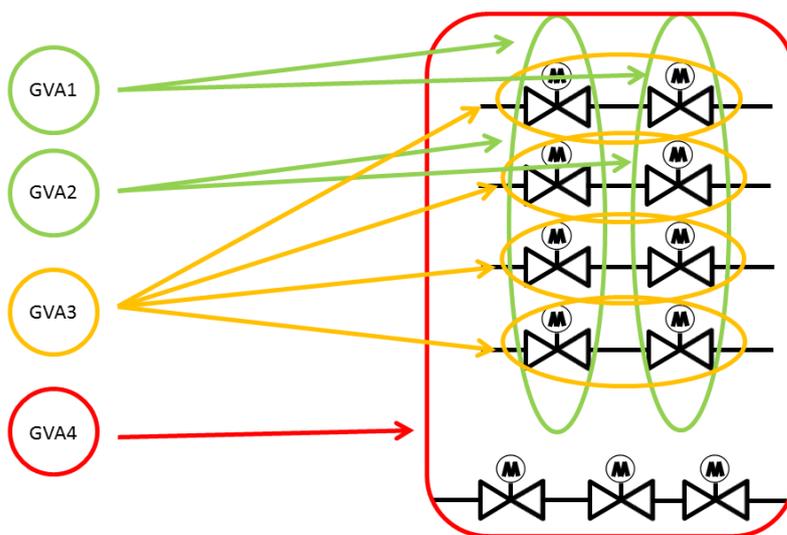


Abb. 2.1 Beispielhafte Zuordnung von GVA-Ereignissen zu verschiedenen Komponentengruppen

Für jede dieser Gruppen werden Unverfügbarkeiten durch GVA geschätzt; für die einzelnen Komponenten ergibt sich die Unverfügbarkeit aus den Mitgliedschaften in den einzelnen verallgemeinerten Komponentengruppen. Der Ausfall einer Komponente lässt sich in der PSA wie in Abb. 2.2 als Oder-Verknüpfung der den verschiedenen möglichen GVA-Ereignissen entsprechenden Basisereignissen modellieren.

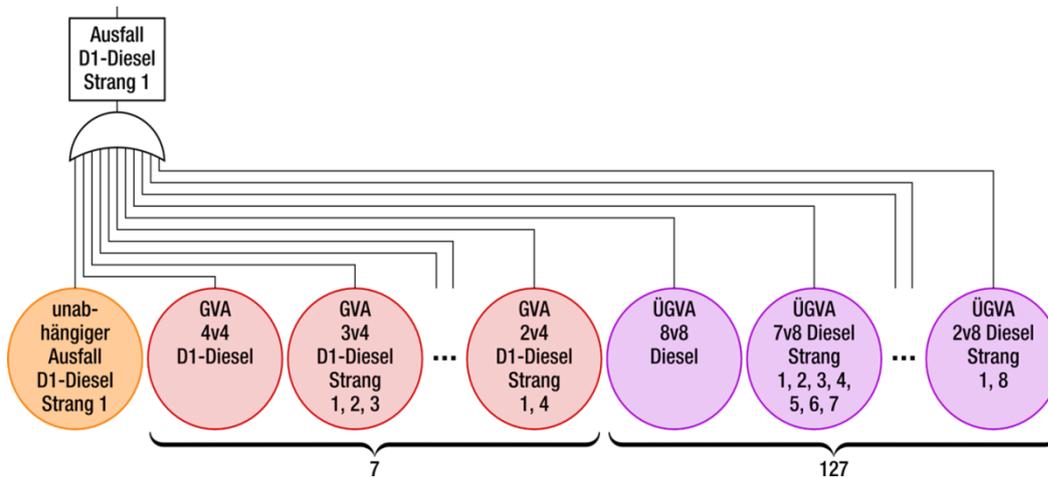


Abb. 2.2 Beispiel für die Modellierung eines komponentengruppenübergreifenden GVA im Fehlerbaum

Die konkrete Berechnung der GVA- bzw. ÜGVA-Ausfallwahrscheinlichkeiten kann mit einem beliebigen etablierten Modell zur Berechnung von GVA-Wahrscheinlichkeiten erfolgen. Für die weitere Analyse und die beispielhafte Quantifizierung in diesem Projekt wird das Kopplungsmodell der GRS verwendet, wie es in den Veröffentlichungen /FAK 05a/, /KRE 06a/ und /STI 09/ beschrieben wird.

Noch detaillierter auszuarbeiten waren folgende Teile der Methodik:

1. Regeln zur Bildung verallgemeinerter Komponentengruppen
2. Kriterien, welche GVA welchen Komponentengruppen zugeordnet werden
3. Methoden, wie aus bestehenden Bewertungen von GVA-Ereignissen, Bewertungen für komponentengruppenübergreifende GVA-Ereignisse abgeleitet werden können
4. Sonstige notwendige Modifikationen an Eingangsgrößen für das Kopplungsmodell

Diese Lücken sollen in den folgenden Abschnitten geschlossen werden.

2.3 Bildung verallgemeinerter Komponentengruppen

Die Verknüpfung von Komponentengruppen mit der beobachteten Betriebserfahrung ist an zwei Stellen in der Methode relevant. Erstens, wenn grundsätzlich bestimmt wird, welche verallgemeinerten Komponentengruppen zu modellieren sind. Zweitens, wenn

für die verallgemeinerten Komponentengruppen Zuverlässigkeitskenngrößen bestimmt werden. Hierbei muss jedem Ereignis eine Komponentengruppe zugeordnet werden.

Verallgemeinerte Komponentengruppen können grundsätzlich ohne eine Auswertung der Betriebserfahrung basierend auf einer technischen Beurteilung der Gleichartigkeit einzelner Bauteile oder spezifischer Umgebungs- und Betriebsbedingungen der Komponenten definiert werden. Dadurch kann eine sehr große Anzahl an verallgemeinerten Komponentengruppen, die lediglich durch das kombinatorische Maximum der Anzahl der insgesamt zu betrachtenden Komponenten begrenzt wird, definiert werden, ohne dass tatsächliche Ausfälle beobachtet wurden, die eine dieser verallgemeinerten Komponentengruppen betroffen hätten. Bedingt durch die Nullfehlerstatistik (sofern diese durch das verwendete mathematische Modell unterstützt wird) ist die korrespondierende Ausfallwahrscheinlichkeit größer Null, so dass auch ohne real beobachtete Komponentengruppenübergreifende GVA die Ausfallwahrscheinlichkeit willkürlich angehoben werden kann. Es empfiehlt sich daher im Sinne einer realistischen Modellierung lediglich in begründeten Ausnahmefällen verallgemeinerte Komponentengruppen so festzulegen und ansonsten auf eine Auswertung der Betriebserfahrung zurückzugreifen. Unterstützt das mathematische Modell die Bestimmung von Ausfallwahrscheinlichkeiten ohne Ereignisse nicht (keine Nullfehlerstatistik), so können ohnehin nur für verallgemeinerte Komponentengruppen mit entsprechender Betriebserfahrung Zuverlässigkeitskenngrößen bestimmt werden.

Die Komponentengruppen für normale GVA sind definiert als eine Menge an Komponenten, die gleichartig und in ihren Betriebsbedingungen vergleichbar sind. An Hand dieser Definition kann man zunächst grundsätzlich davon ausgehen, dass alle Komponenten einer normalen Komponentengruppe für jeden GVA anfällig sind, der auf eine ihrer Komponenten übertragbar ist. Verallgemeinerte Komponentengruppen können demnach aus den Komponentengruppen für normale GVA zusammengesetzt werden. Die kleinstmögliche verallgemeinerte Komponentengruppe besteht dann aus einer Komponentengruppe für normale GVA. Die größtmögliche verallgemeinerte Komponentengruppe besteht dann aus allen Komponenten dieser Komponentenart.

In /LEB 15/ wurde auch untersucht, ob es GVA gibt, bei denen Ausfälle systematisch nicht auf Teile der Komponentengruppe übertragbar waren, weil eine Teildiversität bestand. Dabei wurden folgende diversitären Aspekte gefunden:

1. Verwendung einer nicht typgleichen Komponente

2. Redundanzweise Einführung neuer Komponenten
3. Nicht gleichzeitig durchgeführte Wartungsarbeiten
4. Unterschiedliches Alter der verwendeten Komponenten
5. Unterschiedliche Umgebungsbedingungen

Die Aspekte 1-4 betreffen in der Regel die Komponenten einer oder mehrerer Redundanten, daher bietet es sich an bei Vorhandensein entsprechender Phänomene auch redundanzbeschränkte verallgemeinerte Komponentengruppen zu bilden. Aspekt 5 ist in seinen Auswirkungen sehr individuell, daher kann keine allgemeine Regel zur Bildung von verallgemeinerten Komponentengruppen abgeleitet werden.

2.4 Zuordnung von GVA-Ereignissen zu Komponentengruppen

Um für verallgemeinerte Komponentengruppen Zuverlässigkeitskenngrößen berechnen zu können, müssen die beobachteten GVA-Ereignisse den verallgemeinerten Komponentengruppen zugeordnet werden. Die Einschätzung, welcher verallgemeinerten Komponentengruppe ein GVA zugeordnet wird, muss aus den vorliegenden technischen Informationen zu den GVA-Ereignissen abgeleitet werden und stellt eine zusätzliche Eingangsgröße für die Berechnung der GVA-Wahrscheinlichkeiten dar. Je nach verwendetem Ansatz, kann es sich dabei um eine rein qualitative Größe (z.B. komponentengruppenübergreifender Ausfall möglich ja/nein) oder um eine quantitative Größe, die auf einer qualitativen Expertenschätzung beruht (z.B. eine Wahrscheinlichkeit, dass ein GVA-Mechanismus komponentengruppenübergreifende Auswirkungen zur Folge hat), handeln.

Zur Beurteilung, ob ein Ereignis komponentengruppenübergreifende Auswirkungen haben kann, wurden drei Modellansätze entwickelt:

Modell 1: Erstens wurde eine binäre Entscheidung, ob ein Ereignis komponentengruppenübergreifende GVA verursachen kann oder nicht, an Hand der tatsächlich betroffenen Komponenten betrachtet. Hierbei wird eruiert, welche GVA-Mechanismen beobachtet wurden, die tatsächlich zu Ausfällen an mehreren Komponenten führten, die unterschiedlichen „normalen“ Komponentengruppen zugeordnet sind. Diese werden als komponentengruppenübergreifend betrachtet und der verallgemeinerten Komponentengruppe zugeordnet, die die Kombination der betroffenen „normalen“ Kompo-

nentengruppen darstellt. Ereignisse, bei denen es nur zu Ausfällen in einer „normalen“ Komponentengruppe gekommen ist, werden als nicht komponentengruppenübergreifend betrachtet und dementsprechend der verallgemeinerten Komponentengruppe zugewiesen, die identisch mit der „normalen“ Komponentengruppe ist.

Vorteile dieses Modells:

- Einfache Umsetzung, da die Anzahl der komponentengruppenübergreifenden Ereignisse minimiert wird und die vorzunehmenden Änderungen am Berechnungsverfahren für GVA-Wahrscheinlichkeiten in einem überschaubaren Rahmen bleiben und per Hand vorgenommen werden können. Der Aufwand für die Modifikation der Fehlerbäume bleibt davon unabhängig.
- Die Entscheidung, welche GVA komponentengruppenübergreifende Auswirkungen haben können, erfolgt nach sehr eindeutigen, „harten“ Kriterien und ist daher einfach durchführbar. Auf Grund der harten Kriterien ist diese Einstufung keine relevante Unsicherheitsquelle.

Dem steht folgender Nachteil gegenüber:

- Da alle Ereignisse, die potentiell komponentengruppenübergreifende Auswirkungen hätten haben können, aber konkret nur innerhalb einer Gruppe beobachtet wurden, als prinzipiell nicht komponentengruppenübergreifend eingestuft werden, unterschätzt dieses Modell die tatsächlichen Auswirkungen von komponentengruppenübergreifenden GVA systematisch.

Modell 1 ist daher geeignet, um eine untere Abschätzung über die Mindestauswirkungen von komponentengruppenübergreifenden GVA vorzunehmen.

Modell 2: Um die systematische Unterschätzung durch das Modells 1 zu umgehen oder abzuschwächen, wurde im Modell 2 zwar an einer qualitativen Einstufung festgehalten, die Kriterien zur Einstufung als komponentengruppenübergreifender Ausfall allerdings relaxiert. Zusätzlich zu den Ereignissen aus Modell 1 wurden auch Ereignisse, bei denen Vorsorgemaßnahmen an beiden Gruppen vorgenommen wurden, als komponentengruppenübergreifend eingestuft. Außerdem wurden auch unabhängige GVA-Ereignisse bei denen aus ähnlichen Ursachen in kurzem zeitlichen Abstand in verschiedenen Komponentengruppen Ausfälle auftraten als potentiell komponentengruppenübergreifend betrachtet.

Die nicht-konservative Annahme des Modell 1, dass Ereignisse, die nur in einer Komponentengruppe Auswirkungen zeigten, nicht komponentengruppenübergreifend werden können, wird zwar nicht fallen gelassen, durch die weniger strengen Auswahlkriterien ist aber anzunehmen, dass weniger komponentengruppenübergreifende Ereignisse irrtümlich als nicht komponentengruppenübergreifend identifiziert werden.

Modell 2 erfordert einen etwas größeren Aufwand als Modell 1 hinsichtlich der Bewertung, da hier die Entstehung des Schädigungsmechanismus im Detail von jedem bewertenden Experten zu betrachten und bewerten ist und innerhalb der Expertengruppe diskutiert werden muss, ob Ereignisse als potentiell komponentengruppenübergreifend gewertet werden. Trotzdem bleibt der zusätzliche Aufwand in einem überschaubaren Rahmen. Das Modell kann durch Modifikationen an den vorhandenen Programmen erprobt werden.

Als nachteilig erweist sich allerdings, dass durch subjektiv geprägte Einstufung der GVA-Mechanismen als von ähnlicher Ursache eine neue Unsicherheitsquelle hinzukommt. Für diese wäre eigentlich eine mathematische Methode zur Quantifizierung dieser Unsicherheit zu erarbeiten.

Modell 2 wird trotz dieses Defizits exemplarisch angewandt um eine Einschätzung der Auswirkungen von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen zu erhalten, die nicht von einer systematischen Unterschätzung geprägt ist.

Modell 3: Der dritte Ansatz wäre eine quantitative Beschreibung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis komponentengruppenübergreifende Auswirkungen entwickelt als normierter Vektor mit Elementen zwischen null und eins. Jedem Vektorelement wird dabei eine bestimmte verallgemeinerte Komponentengruppe zugeordnet. Ein Vektorelement wird auf null gesetzt, wenn es aus technischen Gründen unmöglich ist, dass das GVA-Ereignis auf genau die Komponenten der entsprechenden verallgemeinerten Komponentengruppe wirkt. Ein Vektorelement wird auf eins gesetzt, wenn sicher ist, dass das GVA-Ereignis auf jeden Fall die entsprechende verallgemeinerte Komponentengruppe betrifft. Mit Vektorelementen zwischen null und eins kann der beurteilende Experte eine Einschätzung abgeben, für wie wahrscheinlich er eine Übertragbarkeit auf die entsprechende verallgemeinerte Komponentengruppe basierend auf den vorliegenden Informationen hält. Insgesamt müssen die Vektorelemente summiert eins ergeben.

Modell 3 erfordert in jedem Falle eine detaillierte, qualitative, ingenieurtechnische Beurteilung, aus der abgeleitet wird inwieweit das Ereignis die verschiedenen verallgemeinerten Komponentengruppen betreffen kann. Hierzu empfiehlt sich eine mehrstufige Betrachtung:

In einem ersten Schritt wird betrachtet, ob die von dem GVA-Mechanismus betroffene technische Funktion grundsätzlich überhaupt in allen Komponentengruppen vorhanden ist. Beispielhaft für eine Funktion, die in allen verallgemeinerten Komponentengruppen vorhanden ist, wäre ein Schnelleinschaltvorgang des Generatorschalters um den Generator mit der zugehörigen Notstromschiene zu synchronisieren, der so bei allen Notstromdieseln und somit auch bei allen verallgemeinerten Komponentengruppen der Notstromdiesel vorhanden ist. Ein entsprechendes Ereignis wäre in Schritt 2 weiter zu betrachten. Beispielhaft für eine Funktion, die nicht in allen verallgemeinerten Komponentengruppen realisiert ist, wäre, um bei dem Beispiel der Notstromdiesel zu bleiben, eine SF6-Löscheinrichtung um beim Öffnen des Generatorschalters entstehende Lichtbögen zu löschen. Diese sind nur bei Mittelspannungsschaltern, wie sie an den D1-Dieseln im Einsatz sind, notwendig.

Bei einer Quantifizierung des übergreifenden Charakters als Wahrscheinlichkeit für ein komponentengruppenübergreifendes Auftreten kann die Absenz der betroffenen technischen Funktion in der verallgemeinerten Komponentengruppe als Argument für eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit für eine Übertragbarkeit herangezogen werden. Dies ist dann sinnvoll, wenn keine detaillierteren Informationen über die Verwendung des Betriebsmittels an anderen Stellen verfügbar sind. Kommen die betroffenen Betriebsmittel in unterschiedlichen technischen Funktionen zum Einsatz ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass sich die Betriebsbedingungen der betroffenen Betriebsmittel im Detail unterscheiden.

Als zweiter Schritt wird beurteilt, ob die technische Umsetzung der Funktion in beiden Gruppen vergleichbar ist. Die oben bereits betrachtete Funktion „Schnelleinschaltvorgang des Generatorschalters zur Synchronisation mit der Notstromschiene“ wird beispielsweise über das motorbetätigte Aufspannen und Entlasten von Kraftspeicherfedern realisiert. Dies wird sowohl bei den Generatorschaltern der D1- als auch bei denen der D2-Diesel derartig gehandhabt. Die technische Umsetzung ist also identisch. Ein Beispiel für unterschiedliche technische Umsetzungen wäre die Abfuhr der Abwärme aus den Motor- und Turboladerkühlkreisen der entsprechenden Diesel. Bei D1-Dieseln erfolgt diese über Wärmetauscher an das gesicherte Zwischen- oder Ne-

benkühlwassersystem. Bei D2-Dieseln wird diese Wärme in die Deionatbecken abgeführt. Daraus ergeben sich auch Unterschiede in der Wasserchemie.

Bei einer Quantifizierung des übergreifenden Charakters als Wahrscheinlichkeit für ein komponentengruppenübergreifendes Auftreten kann eine unterschiedliche technische Umsetzung der betroffenen Funktion in der anderen Dieselgruppe als Argument für eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit für ein komponentengruppenübergreifendes Auftreten herangezogen werden. Dies kann wie oben bei Schritt 1 dargelegt begründet werden.

Als dritter und zentraler Schritt wird dann das betroffene Betriebsmittel selbst betrachtet und beurteilt, ob es in der anderen Dieselgruppe prinzipiell vorkommt und ob die für den Schadensmechanismus relevanten Betriebsbedingungen vorliegen. Bei dem Beispiel der Generatorschalter könnten die Kraftspeicherfedern, als vom Ereignis betroffene Betriebsmittel, genauer betrachtet werden. Die Federn können, aber müssen nicht zwingend einen unterschiedlichen Aufbau haben (z.B. Teller- oder Spiralfedern). Zu den Betriebsbedingungen gehören, sofern sie für den konkreten Ausfallmechanismus von Relevanz sind:

- Chemische bzw. physikalische Bestandteile des Betriebsmittels
Chemische Alterungsprozesse sind abhängig von den Materialien aus denen die betroffenen Betriebsmittel bestehen. Auch Korrosionsphänomene sind abhängig von Werkstoff bzw. Material.
- Umgebungsbedingungen
Ebenso sind Alterungsprozesse davon abhängig, welchen Umgebungsbedingungen die betroffenen Betriebsmittel ausgesetzt sind. Dies betrifft einerseits Parameter wie beispielsweise die Temperatur, die bestimmen wie schnell chemische Alterungsphänomene voranschreiten und andererseits die Frage, ob unter diesen Umgebungsbedingungen bestimmte Reaktionspartner für chemische Alterungsreaktionen vorhanden sind, also eine chemische Alterungsreaktion überhaupt ablaufen kann (dies kann z.B. abhängig von den Betriebsmedien oder verwendeten Hilfsstoffen sein). Verschmutzungsphänomene setzen voraus, dass Betriebsmedien o.ä. als Verschmutzungsquellen dienen können.
- Betriebsbelastungen
Schädigungsprozesse können auch von der betrieblichen Belastung abhängen. Hierbei sind insbesondere Bruch- und Rissphänomene, die abhängig von den

Schwingungen sind, denen das Betriebsmittel ausgesetzt ist, zu nennen. Ebenfalls können sich Verbindungen abhängig von Schwingungen und Vibrationen lockern oder lösen. Auch die Anzahl der absolvierten Lastzyklen kann eine Rolle spielen.

- Personal und Arbeitsanweisungen
Montagefehler und Fehler bei der Instandhaltung sind dann komponentengruppenübergreifend, wenn das gleiche Personal handelt oder nach den gleichen defizitären Arbeitsanweisungen vorgegangen wird.
- Konzeptionelle Ähnlichkeiten
Vor allem bei Auslegungsfehlern, die auf dem grundsätzlichen Fehlen von notwendigen Betriebsmitteln oder der Fehleinschätzung von Umgebungsbedingungen in der Konzeption der Komponente beruhen, ist zu beurteilen inwieweit diese Konzeption auch für die Auslegung der anderen Komponentengruppe relevant war.

Modell 3 erfordert folglich den höchsten Aufwand in der ingenieurstechnischen Bewertung der Betriebserfahrung. Darüber hinaus entsteht auch mathematisch der größte Aufwand unter den drei hier dargestellten Modellen: Inwieweit der komponentengruppenübergreifende Charakter eines GVA-Mechanismus Auswirkungen auf die GVA-Wahrscheinlichkeiten entwickelt, kann über ein Monte-Carlo-Verfahren berechnet werden. Mit einer den Vektorelementen der Expertenschätzungen entsprechenden Wahrscheinlichkeit wird das Ereignis im Rahmen des Monte-Carlo-Verfahrens der entsprechenden verallgemeinerten Komponentengruppe zugeordnet und geht entsprechend in die Rechnung ein. Die mit der Expertenschätzung einhergehende Unsicherheit kann über ein Bayes'sches Verfahren modelliert werden.

Einem praktischen Einsatz steht die Problematik entgegen, dass ein derartiges zusätzliches Monte-Carlo-Verfahren im PEAK-Programm zur Berechnung von GVA-Wahrscheinlichkeiten zur Zeit nicht vorgesehen ist und auch mit den im Rahmen dieses Projekts vorgesehenen Mitteln nicht implementiert werden kann. Auch die Nachbewertung von Ereignissen aus der Betriebserfahrung ist mit diesem Modell deutlich zeitaufwändiger als mit den beiden ersten vorgestellten Ansätzen.

Modell 3 kann daher momentan nicht zur Abschätzung von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen herangezogen werden. Für die Beispielquantifizierung werden die Modelle 1 und 2 herangezogen.

2.5 Methode zur Ableitung von Expertenbewertungen für komponenten- gruppenübergreifende GVA-Ereignisse

Der Kopplungsparameter η_j ist im Kopplungsmodell der GRS als die Wahrscheinlichkeit definiert, dass bei Auftreten eines GVA-Phänomens j eine der Komponenten der Komponentengruppe (bzw. hier der verallgemeinerten Komponentengruppe) ausfällt. Die einzelnen Komponenten der (verallgemeinerten) Komponentengruppe fallen voneinander stochastisch unabhängig mit der Wahrscheinlichkeit η_j aus. Der Kopplungsparameter η_j eines Ereignisses wird im Kopplungsmodell aus den Bewertungen, die einzelne Experten zu dem Ereignis abgeben, abgeleitet. Die Experten bewerten dabei, welche der betroffenen Komponenten ausgefallen, stark, schwach, sehr schwach oder gar nicht beschädigt waren. Diese Schädigungsgrade korrespondiert mit Ausfallwahrscheinlichkeiten bei Anforderung von 1, 0,5, 0,1, 0,01 und 0, wobei der Experte auch eigene Ausfallwahrscheinlichkeiten definieren kann. Eine solche Experteneinschätzung, welche Komponenten bei einem Ereignis mit einem bestimmten Schädigungsgrad betroffen waren, kann in Form eines sogenannten Schädigungsvektors formuliert werden, wobei jeder Skalar des Vektors für den eingeschätzten Schädigungsgrad einer Komponente steht. Kombinatorisch kann aus einem n -dimensionalen Schädigungsvektor der zugehörige n -dimensionale Interpretationsvektor bestimmt werden, dessen i -tes Element aus den Wahrscheinlichkeiten, dass der GVA-Mechanismus bei Auftreten einen i von n -GVA verursacht, besteht (i und n sind hierbei beliebige natürliche Zahlen, wobei gilt $i \leq n$). Die Elemente des Interpretationsvektors werden als Gewichtung für die aposteriori Wahrscheinlichkeitsdichten, die aus einem nichtinformativen Apriori für einen i von n Ausfall gewonnen werden, benutzt. Für die Wahrscheinlichkeitsdichte des Kopplungsparameters η_j eines Ereignisses j gilt somit:

$$p(\eta_j) = \sum_{i=0}^n w_{i \setminus n} \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(i+\frac{1}{2})\Gamma(n-i+\frac{1}{2})} \eta_j^{i-\frac{1}{2}} (1-\eta_j)^{n-i-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Hierbei ist $w_{i \setminus n}$ das i -te Element des Interpretationsvektors.

Bei Ereignissen, deren zugrundeliegender GVA-Mechanismus als komponentengruppenübergreifend eingestuft wurde, kann der geänderte Kopplungsparameter folglich über eine Änderung der Expertenbewertungen angepasst werden. Auch andere GVA-Modelle bauen auf derartigen Expertenbewertungen auf, so dass das im Folgenden

beschriebene Vorgehen grundsätzlich auch bei Verwendung eines anderen GVA-Modells anwendbar bleibt. Die bisherige Bewertung von GVA-Ereignissen wurde in Expertenrunden unter Beteiligung von GRS und Betreibern durchgeführt und von allen Parteien umfangreich qualitätsgesichert. Auf Grund der fachlichen Fundierung dieser Bewertungen sind nach Möglichkeit daher die bisherigen Expertenbewertungen von GVA-Ereignissen bei der Bewertung der Auswirkungen von komponentengruppenübergreifenden GVA-Ereignissen zu berücksichtigen. Dabei sind grundsätzlich drei verschiedene Situationen zu unterscheiden:

Erstens GVA-Ereignisse, deren Auswirkungen auf die verschiedenen „normalen“ Komponentengruppen, aus denen die betroffene verallgemeinerte Komponentengruppe besteht, bereits bewertet wurden. Die Auswirkungen auf die einzelnen Komponentengruppen wurden dabei üblicherweise als einzelne, separate GVA-Ereignisse interpretiert. Für das Ausfallverhalten dieser Komponentengruppen existieren bereits Einträge in der GRS-GVA-Datenbank einschließlich entsprechender Expertenbewertungen. Für die Bewertung als komponentengruppenübergreifender GVA können alle diese Einträge zusammengelegt werden. Die Schädigungsvektoren der verschiedenen Ereignisse werden für jeden Experten aneinandergehängt, die Komponentengruppengrößen werden addiert.

Potentielle Probleme könnten entstehen, wenn ein oder mehrere Experten Schädigungsgraden individuelle Ausfallwahrscheinlichkeiten zugewiesen haben und dies nicht bei allen zusammenzulegenden Ereignissen konsistent getan haben. Dies kann, wenn alle Schädigungsgrade jeweils an mindestens einer Komponente beobachtet wurden, die Definition eines zusätzlichen Schädigungsgrades erfordern. Grundsätzlich stellt dies in der mathematischen Handhabung im Kopplungsmodell kein Problem dar, die konkret programmierte Umsetzung der Bildung des Interpretationsvektors in den Programmen POOL und PEAK geht allerdings davon aus, dass lediglich vier verschiedene Ausfallwahrscheinlichkeiten im Schädigungsvektor vorkommen, wovon einer auch immer der vollständige Ausfall mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von eins ist. Daher wären umfangreichere Anpassungen in den Programmen POOL und PEAK notwendig, um derartige Einzelfälle sauber zu überführen. Diese potentielle Problematik wurde in der Praxis bisher allerdings nicht beobachtet. Bei allen Ereignissen mit ereignisspezifischen Ausfallwahrscheinlichkeiten für Schädigungsgrade wurden genügend Schädigungsgrade nicht beobachtet, so dass man den Fall durch eine Umgruppierung abfangen kann. Eine derartige Umgruppierung soll an Hand eines Beispiels illustriert werden:

Sollen beispielsweise die GVA-Ereignisse A und B zu einem komponentengruppenübergreifenden GVA-Ereignis C kombiniert werden und hat ein Experte beispielsweise den Schädigungsgrad „Schwach geschädigt“ nur bei dem GVA-Ereignis A mit einer ereignisspezifischen Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,2 bewertet, ergäbe sich bei dem kombinierten GVA-Ereignis C ein Problem, wenn alle anderen Schädigungsgrade ebenfalls beobachtet worden wären, da dann mehr als vier unterschiedliche Ausfallwahrscheinlichkeiten in den Schädigungsvektoren vorkommen. Wurde allerdings ein Schädigungsgrad, beispielsweise „geschädigt“, bei keinem der beiden Ereignisse A und B beobachtet, kann folgendermaßen vorgegangen werden: Die Komponenten, die bei dem Ereignis B als „schwach geschädigt“ bewertet wurden, werden auch bei dem kombinierten Ereignis C als „schwach geschädigt“ eingestuft. Die Komponenten, die bei dem Ereignis A als „schwach geschädigt“ bewertet wurden, werden im kombinierten Ereignis C als „geschädigt“ eingestuft. Außerdem werden ereignisspezifische Ausfallwahrscheinlichkeiten definiert. „Geschädigte“ Komponenten werden mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,2 versehen, also genau mit der Ausfallwahrscheinlichkeit, die vorher bei dem Ereignis A in Verwendung war.

Außerdem muss ein Experte, dessen Bewertung für ein komponentengruppenübergreifendes GVA-Ereignis herangezogen wird, auch alle zusammenzulegenden GVA-Ereignisse bewertet haben. Typischerweise ist dies der Fall (insbesondere bei Verwendung des Modells 1). Wenn nicht, muss der entsprechende Experte entweder die fehlenden Expertenbewertungen nachträglich abgeben oder er kann nicht zur Auswertung herangezogen werden.

Zweitens sind GVA-Ereignisse zu betrachten, die sich auf verallgemeinerte Komponentengruppen auswirken, die aus mindestens einer Komponentengruppe mit vorhandenen Expertenbewertungen und einer beliebigen Anzahl von Komponentengruppen zusammengesetzt wurden, deren Verhalten unter Einfluss des GVA-Mechanismus bisher nicht bewertet wurde. Auch hier wird für die bereits bewerteten Komponenten eine Schädigung entsprechend der bereits abgegebenen Expertenbewertungen angesetzt. Die Bildung einer derartigen verallgemeinerten Komponentengruppe setzt voraus, dass im Rahmen der Bewertung des komponentengruppenübergreifenden Charakters eine grundsätzliche technische Übertragbarkeit ermittelt wurde. Da bisher keine Expertenbewertungen angegeben wurden, kann es sich nur um sehr geringfügige Schädigungen, die noch weit von einer Funktionseinschränkung entfernt sind handeln. Daher kann gemäß /FAK 05/ und /NRC 07/ von einer „sehr schwachen“ Schädigung für die

Komponenten ausgegangen werden, für die bisher noch keine Expertenbewertungen vorliegen.

Drittens sind GVA-Ereignisse zu betrachten, die sich auf verallgemeinerte Komponentengruppen auswirken, für die bisher noch gar keine Expertenbewertungen vorliegen. Hier müssen die Ereignisse entsprechend den Richtlinien aus /FAK 05/ und /NRC 07/ wie normale GVA-Ereignisse bewertet werden, lediglich die Größe der Komponentengruppe ist entsprechend der Größe der verallgemeinerten Komponentengruppe zu wählen. Für die Beispielrechnungen am Ende dieses Kapitels ist dieser Fall nicht relevant, da für die Rechnungen nur die bereits vollständig ausgewertete Betriebserfahrung deutscher Kernkraftwerk bis zum Jahr 2010 berücksichtigt wurde.

2.6 Notwendige Modifikationen an Eingangsgrößen für das Kopplungsmodell

Zusätzlich zum Kopplungsparameter η_j müssen auch einige weitere Eingangsgrößen des Kopplungsmodells für die Berechnung von komponentengruppenübergreifenden GVA modifiziert werden.

2.6.1 Anpassung der Beobachtungszeiten

Bei der Beobachtungszeit T bzw. $T_{üb}$ (Beobachtungszeit für komponentengruppenübergreifende GVA) handelt es sich um die Zeitdauer, über die sich die Auswertung zu einer Komponentenart insgesamt erstreckt. Sie ist umgekehrt proportional zur Eintrittswahrscheinlichkeit eines GVA-Phänomens. Die Beobachtungszeiten werden normalerweise in dem Programm POOL berechnet und an das Programm PEAK übergeben und dort zur Berechnung von GVA-Wahrscheinlichkeiten verwendet. Die Beobachtungszeiten werden in POOL folgendermaßen ermittelt:

Der Beitrag einer Komponentengruppe zur Beobachtungszeit besteht aus einer gewichteten Differenz zwischen Anfangs- und Enddatum der Beobachtung. Als Anfangsdatum t_A kommen drei unterschiedliche Daten in Frage:

- Auswertungsbeginn $t_{A,AW}$
- Inbetriebnahme der Komponentengruppe $t_{A,KG}$
- Gewählter Zeitpunkt, ab dem Betriebserfahrung berücksichtigt werden soll $t_{A,G}$

Damit die Komponentengruppe zur Beobachtungszeit beitragen kann, müssen alle drei Daten verstrichen sein, d.h. die Komponentengruppe muss in Betrieb sein ($t_{A,KG}$), es müssen eventuelle Ausfälle in diesem Zeitraum erfasst und ingenieurstechnisch bewertet worden sein ($t_{A,AW}$) und Betriebserfahrung aus diesem Zeitraum soll im Rahmen der GVA benutzt werden ($t_{A,G}$). Folglich ist das Späteste dieser drei Daten gleich dem Anfangsdatum der Beobachtung t_A :

$$t_A = \text{Max}(t_{A,AW}, t_{A,KG}, t_{A,G}) \quad (2.2)$$

Analog kann man auch auf das Enddatum der Beobachtung schließen, wobei die drei relevanten Daten dann

- Auswertungsende $t_{E,AW}$
- Außerbetriebnahme der Komponentengruppe $t_{E,KG}$
- Gewählter Zeitpunkt, bis zu dem Betriebserfahrung berücksichtigt werden soll $t_{E,G}$

sind. Für das Enddatum der Beobachtung t_E gilt dann:

$$t_E = \text{Min}(t_{E,AW}, t_{E,KG}, t_{E,G}) \quad (2.3)$$

Bei verallgemeinerten Komponentengruppen und komponentengruppenübergreifenden Ausfällen ist nun zusätzlich zu berücksichtigen, dass sie nicht auftreten können, solange nicht alle beteiligten Komponentengruppen in Betrieb genommen werden. Statt den Daten zur In- bzw. Außerbetriebnahme der einzelnen Komponentengruppe muss also hier das späteste Inbetriebnahmedatum bzw. das früheste Außerbetriebnahmedatum aller beteiligten Komponentengruppen gewählt werden. Für das Anfangsdatum $t_{A,\text{üb}}$ der Beobachtung von komponentengruppenübergreifenden GVA gilt also:

$$t_{A,\text{üb}} = \text{Max}(t_{A,AW}, t_{A,KG1}, t_{A,KG2}, \dots, t_{A,KGn}, t_{A,G}) \quad (2.4)$$

Wobei $t_{A,KGi}$ jeweils das Inbetriebnahmedatum einer der Komponentengruppen, die von dem komponentengruppenübergreifenden GVA betroffen sein können, darstellt.

Analog gilt für das Enddatum $t_{E,\ddot{u}b}$ der Beobachtung von komponentengruppenübergreifenden GVA:

$$t_{E,\ddot{u}b} = \text{Min}(t_{E,AW}, t_{E,KG1}, t_{E,KG2}, \dots, t_{E,KGn}, t_{E,G}) \quad (2.5)$$

Wobei $t_{E,KGi}$ jeweils das Außerbetriebnahmedatum einer der Komponentengruppen, die von dem komponentengruppenübergreifenden GVA betroffen sein können, darstellt.

Der Beitrag eines Kernkraftwerks zur gesamten Beobachtungszeit ist dann:

$$T_{KKW,\ddot{u}b} = \sum_{AW} (t_{E,\ddot{u}b} - t_{A,\ddot{u}b}) * \Theta(t_{E,\ddot{u}b} - t_{A,\ddot{u}b}) * w_{AW} \quad (2.6)$$

Hierbei wurde die Differenz aus Anfangs- und Enddatum mit dem Gewichtungsfaktor w_{AW} der Auswertungsperiode AW multipliziert und über alle vorhandenen Auswertungsperioden summiert. Der Gewichtungsfaktor w_{AW} trägt der Tatsache Rechnung, dass nicht alle Ausfallarten zu jedem Betriebszeitpunkt auftreten können. Die Heaviside-Funktion Θ stellt sicher, dass nur Terme einen Beitrag liefern, bei denen der Beginn der Beobachtung tatsächlich vor dem Ende liegt. Im Gegensatz zur Berechnung der Beobachtungszeit von normalen GVA muss die Anzahl der Komponentengruppen nicht berücksichtigt werden, da die betrachteten Komponenten definitionsgemäß alle gleichzeitig von den GVA-Mechanismen beeinträchtigbaren Komponenten umfassen.

Um die Gesamtbeobachtungszeit $T_{\ddot{u}b}$ für den komponentengruppenübergreifenden GVA zu erhalten, muss über alle Kernkraftwerke summiert werden:

$$T_{\ddot{u}b} = \sum_{KKW'} T_{KKW,\ddot{u}b} \quad (2.7)$$

Bei der Summation der Beiträge einzelner Kernkraftwerke liefern Anlagen, die nicht alle Komponentengruppen der verallgemeinerten Komponentengruppe besitzen, keinen Beitrag, da sich dort keine entsprechenden komponentengruppenübergreifenden gemeinsamen Ausfälle ereignen können. Deshalb wird nicht über alle KKW summiert,

sondern nur über die reduzierte Menge KKW' der Anlagen, bei denen diese komponentengruppenübergreifenden Ausfälle grundsätzlich beobachtet werden können.

2.6.2 Anpassung der Fehlerentdeckungszeit

Die Fehlerentdeckungszeit T_j ist die Zeit nach der ein GVA-Ausfall an den Komponenten bemerkt wird und wird durch die Instandhaltungsstrategie der beobachteten Komponente bestimmt. Sie ist proportional zur Eintrittswahrscheinlichkeit eines GVA-Phänomens.

Bei versetzter Testweise der einzelnen Komponenten wird bei der Berechnung normaler GVA-Wahrscheinlichkeiten angenommen, dass der GVA durchschnittlich bei der zweiten Prüfung einer der beteiligten Komponenten entdeckt wird. Zwar wird in der Regel unmittelbar nach einem Ereignis bzw. einem Ausfall im Rahmen der Ereignisbearbeitung eine Übertragbarkeitsprüfung vorgenommen, so dass viele GVA-Mechanismen unmittelbar nach der ersten auffälligen Prüfung entdeckt werden. Andererseits sind beispielsweise Auslegungsfehler häufig wesentlich länger latent vorhanden als der Abstand zwischen zwei wiederkehrenden Prüfungen. Werden nacheinander die Komponenten K1, K2 und K3 in genau dieser Reihenfolge geprüft, so entspricht unter diesen Annahmen die Fehlerentdeckungszeit T_j :

$$T_j = t_{K1K2} + t_{K2K3} \quad (2.8)$$

Wobei t_{KiKj} der zeitliche Abstand zwischen dem Zeitpunkt der Prüfung an Ki und dem Zeitpunkt der Prüfung an Kj ist.

Diese Annäherung kann auch für komponentengruppenübergreifende GVA-Mechanismen gewählt werden. Da verallgemeinerte Komponentengruppen eine größere Anzahl an Komponenten umfassen, ändern sich die Fehlerentdeckungszeiten. Im Allgemeinen sind diese kürzer als die Fehlerentdeckungszeiten der entsprechenden normalen GVA-Wahrscheinlichkeiten.

Bei gleichzeitiger Prüfung entspricht die Fehlerentdeckungszeit bei normalen GVA dem Abstand zwischen den Prüfungen. Diese Überlegung kann für komponentengruppenübergreifende GVA übernommen werden, da auch hier konservativ angenommen wird, dass die geschädigten Komponenten seit ihrer letzten Prüfung geschädigt waren und

davon auszugehen ist, dass bei einer gleichzeitigen Prüfung aller Komponenten ein GVA-Mechanismus auch auffallen würde.

Werden Ausfallraten berechnet, wird eine Rate pro Stunde berechnet und mit der Dauer der Anforderung multipliziert, um eine Ausfallwahrscheinlichkeit zu erhalten. Eine Anpassung der Fehlerentdeckungszeit entfällt dann, die Dauer der Anforderung ist ereignisablaufabhängig und daher unabhängig von der GVA-Modellierung.

2.6.3 Anpassung des Übertragbarkeitsfaktors

Der Übertragbarkeitsfaktor wird von dem bewertenden Experten für jeden beobachteten GVA-Mechanismus separat geschätzt. Da komponentengruppenübergreifende GVA-Mechanismen, zu denen mehrere Einträge in der GVA Datenbank gehören, mit gleichen Übertragbarkeitsfaktoren geschätzt werden, ergibt sich keine Notwendigkeit einer Anpassung. Die Übertragbarkeitsfaktoren ändern sich grundsätzlich nicht, wenn ein komponentengruppenübergreifender GVA betrachtet wird und können aus der normalen GVA-Bewertung übernommen werden.

Wenn es besondere Umstände gibt die eine Reduzierung des Übertragbarkeitsfaktors speziell für komponentengruppenübergreifende Ausfälle rechtfertigen (z.B. wenn die komponentengruppenübergreifenden Einwirkungen im Gegensatz zu den komponentengruppeninternen Einwirkungen mit größerem zeitlichen Abstand erfolgen), kann der Übertragbarkeitsfaktor für den komponentengruppenübergreifenden Fall unter Verwendung der bereits bestehenden Leitlinien zur Bestimmung des Übertragbarkeitsfaktors reduziert werden. Wird der Übertragbarkeitsfaktor $\ddot{U}f_x$ für den komponentengruppenübergreifenden GVA unter den Wert des Übertragbarkeitsfaktors $\ddot{U}f$ des zugrundeliegenden normalen GVA reduziert, so muss das GVA-Ereignis allerdings weiterhin zusätzlich zu dem komponentengruppenübergreifenden GVA als normales GVA-Ereignis mit dem Übertragbarkeitsfaktor $\ddot{U}f'$ berücksichtigt werden, wobei gilt:

$$\ddot{U}f' = \ddot{U}f - \ddot{U}f_x \quad (2.9)$$

Da der Übertragbarkeitsfaktor $\ddot{U}f_x$ hier als bedingte Wahrscheinlichkeit zu interpretieren ist, dass das Ereignis übertragbar ist und komponentengruppenübergreifende Auswirkungen entwickelt. Das normale GVA-Ereignis mit dem Übertragbarkeitsfaktor

$\ddot{U}f'$ steht dann für die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis übertragbar ist, aber keine komponentengruppenübergreifenden Auswirkungen hat.

2.7 Grenzen des Verfahrens

Die Anzahl von GVA-Basisereignissen im Fehlerbaum einer PSA beträgt:

$$N_{GVA-Basisereignisse} = \sum_{GVA-Gruppen\ g} 2^{\mathcal{N}(g)} - \mathcal{N}(g) - 1 \quad (2.10)$$

Wobei $\mathcal{N}(g)$ die Anzahl der Komponenten in der GVA-Gruppe g bezeichnet. Somit können nur übergreifende GVA betrachtet werden, die maximal 8 bis 10 Komponenten betreffen können, da ansonsten die Anzahl der Basisereignisse so stark ansteigt, dass die gängigen Softwarelösungen zur Berechnung von Fehlerbäumen und GVA-Wahrscheinlichkeiten nicht mehr eingesetzt werden können. Das in diesem Kapitel beschriebene Verfahren kann daher nur für Komponententypen angewandt werden, bei denen die Anzahl der Komponenten, wie auch die Anzahl der Komponentengruppen klein ist. Bei einer größeren Anzahl von Komponenten können zwar die beschriebenen Verfahren zur Bestimmung und Bildung von verallgemeinerten Komponentengruppen, der Modifikation von Expertenbewertungen, Beobachtungszeiten, Fehlerentdeckungszeiten und Übertragbarkeitsfaktoren noch Anwendung finden. Die ermittelten Ausfallwahrscheinlichkeiten können allerdings nicht mehr direkt im Fehlerbaum ÜGVA-Basiselementen zugeordnet werden. Stattdessen werden die ÜGVA im Fehlerbaum nicht modelliert und die Ausfallwahrscheinlichkeiten finden bei der Quantifizierung bestimmter Minimalschnitte Verwendung. Das genaue Vorgehen hierfür wird in Kapitel 3.5 beschrieben.

Bei Verwendung des in Abschnitt 2.4 beschriebenen Modells 3 steigt bei einer höheren Anzahl an Komponentengruppen außerdem der Aufwand zur Schätzung der zusätzlichen Parameter. Bei einer größeren Anzahl an Komponentengruppen müssten pro Ereignis für jede Kombination an Komponentengruppen ein eigener Parameter geschätzt werden (und auch die Beobachtungszeit und die Schädigungsvektoren entsprechend angepasst werden). Insgesamt ist also eine zusätzliche Schätzung von $\sum_{i=2}^{n_{KG}} \binom{n_{KG}}{i}$ Parametern pro Ereignis vorzunehmen, wobei n_{KG} die Anzahl der Komponentengruppen ist. Bereits relativ übersichtliche Komponentengruppenmengen erfordern hierbei eine

große Anzahl an zusätzlichen zu schätzenden Parametern (z. B. für $n_{KG} = 4$ immerhin zwölf Parameter pro Ereignis).

2.8 Beispielhafte Quantifizierung eines komponentengruppenübergreifenden Ausfalls der Notstromdiesel unter Verwendung des Kopplungsmodells

Im Folgenden wird die Quantifizierungsmethode exemplarisch für die Quantifizierung eines komponentengruppenübergreifenden Ausfalls der D1 und D2-Diesel ausgeführt. Für die Wahl dieses Beispiels ist ausschlaggebend, dass eine beispielhafte Quantifizierung durchgeführt werden sollte, bevor Methoden zur Berücksichtigung übergreifender GVA, die eine große Anzahl an Komponenten betreffen können, entwickelt werden. Als ein Beispiel sind Diesel besonders geeignet, da im Rahmen der Betriebserfahrung eine große Anzahl von GVA-Ereignissen beobachtet wurde. Insbesondere wurde auch eine relativ große Anzahl von Ereignissen beobachtet, bei der komponentengruppenübergreifende Phänomene auftraten. Außerdem besitzen deutsche Kernkraftwerke in der Regel zwei Dieselkomponentengruppen mit jeweils vier Komponenten: Die Notstromdiesel des D1-Notstromnetzes und die Notspeisenotstromdiesel des D2-Notstromnetzes. Das in diesem Kapitel beschriebene Verfahren kann also angewendet werden, da die in Abschnitt 2.7 genannten Einschränkungen nicht greifen.

Um eine Abschätzung für die Mindestauswirkungen des komponentengruppenübergreifenden Ausfalls zu erhalten werden Ausfallwahrscheinlichkeiten zunächst mit dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen Modell 1 berechnet. Um eine möglichst realistische Ausfallwahrscheinlichkeiten zu erhalten und die systematische Unterschätzung von Ausfallwahrscheinlichkeiten, die Modell 1 inhärent ist, zu vermeiden, werden außerdem Ausfallwahrscheinlichkeiten nach Modell 2 aus Abschnitt 2.4 und zu Vergleichszwecken Ausfallwahrscheinlichkeiten ohne eine gesonderte Modellierung komponentengruppenübergreifender GVA aber basierend auf der gleichen Betriebserfahrung bestimmt.

Die Bildung von verallgemeinerten Komponentengruppen ist auf Grund der kleinen Anzahl von Komponenten sehr einfach. Es werden insgesamt drei verallgemeinerte Komponentengruppen gebildet:

1. Die Notstromdiesel des D1-Notstromnetzes
2. Die Notspeisenotstromdiesel des D2-Notstromnetzes

3. Die Notstromdiesel des D1-Notstromnetzes und die Notspeisenotstromdiesel des D2-Notstromnetzes

2.8.1 Bestimmung der Beobachtungszeiten

Bei der Berechnung der Beobachtungszeit der Notstromdiesel wurde folgende Beschränkungen des Auswertungszeitraums vorgenommen: Um eine Vergleichbarkeit der Ausfallwahrscheinlichkeiten zwischen den Rechnungen mit und ohne expliziter Modellierung von komponentengruppenübergreifenden GVA zu gewährleisten, werden im Rahmen der Beispielrechnung zur Berechnung der Beobachtungszeit nur KKW bei denen auch komponentengruppenübergreifende GVA auftreten konnten betrachtet. Zeiten, in denen in einer Anlage nur eine Komponentengruppe in Betrieb war, wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Dies betrifft ältere Anlagen zu Beginn ihrer Betriebszeit in denen später zusätzlicher Diesel nachgerüstet wurden. Im Folgenden wird dargestellt, welche Beobachtungszeiten sich für die einzelnen Anlagen unter diesen Bedingungen ergeben. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die Beiträge der einzelnen Anlagen zur gesamten Beobachtungszeit. Diese beträgt 339,32 Jahre für komponentengruppenübergreifende GVA und 626,98 Jahre für normale GVA. Diese Gesamtbeobachtungszeit muss nun noch auf die Ausfallarten „Betriebsversagen“ und „startet nicht“ aufgeteilt werden. Von der GRS wird basierend auf der Abschätzung einer monatlichen Betriebsdauer angenommen, dass 0,3% der Beobachtungszeit auf einen Betriebszustand entfallen, bei dem es zu einem Ausfall der Ausfallart „Betriebsversagen“ kommen kann und 99,7% der Beobachtungszeit auf einen Betriebszustand, bei dem es zu einem Ausfall der Ausfallart „startet nicht“ kommen kann. Damit ergeben sich die in Tabelle 2.2 aufgelisteten Gesamtbeobachtungszeiten für die einzelnen Ausfallarten.

Tab. 2.1 Übersicht über die Beiträge der einzelnen Anlagen zur Beobachtungszeit

Anlage	Beobachtungszeit komponenten- gruppenübergreifende GVA [in Jahren]	Beobachtungszeit nor- male GVA [in Jahren]
KKW1	12,66	32,81
KKW2	5,00	10,00
KKW3	28,00	28,00
KKW4	25,50	51,00
KKW5	29,08	58,16
KKW6	26,33	52,66
KKW7	26,05	52,10
KKW8	25,25	50,50
KKW9	6,15	12,31
KKW10	22,73	45,45
KKW11	22,46	44,92
KKW12	21,71	43,42
KKW13	25,42	50,83
KKW14	31,84	63,67
KKW15	15,73	15,73
KKW16	15,43	15,43
Gesamt	339,32	626,98

Tab. 2.2 Beobachtungszeiten nach Ausfallart

Ausfallart	Beobachtungszeit komponenten- gruppenübergreifende GVA [in Jahren]	Beobachtungszeit nor- male GVA [in Jahren]
Betriebsversagen	0,93	1,72
Startet nicht	338,39	625,27
Gesamt	339,32	626,98

2.8.2 Auswertung der Betriebserfahrung

Zur Auswertung der Betriebserfahrung von GVA-Ereignissen an Notstromdieseln wurde die GRS-GVA-Datenbank herangezogen. Es wurden insgesamt 47 Einträge der

GVA-Datenbank untersucht. Dabei wurden zunächst diejenigen herausgefiltert, die in den in Abschnitt 2.8.1 definierten Zeiträumen in den Anlagen, die mehrere Dieselgruppen in Betrieb hatten, beobachtet wurden. Es verblieben 28 GVA-Einträge.

Im Rahmen der Auswertung wurden drei Ereignisse gefunden, die sich auf fünf Datenbankeinträge verteilten, bei denen es zu direkten Funktionsbeeinträchtigungen in mehreren Komponentengruppen kam. Entsprechend den Kriterien von Modell 1 aus Abschnitt 2.4 handelt es sich hierbei um komponentengruppenübergreifende Ausfälle.

Des Weiteren wurden zwei weitere Ereignisse verteilt auf vier Datenbankeinträge gefunden, nach denen in mehreren Komponentengruppen Optimierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Diese sind gemäß den Kriterien von Modell 1 nicht als komponentengruppenübergreifende Ausfälle einzustufen, wohl aber gemäß den Kriterien von Modell 2. Somit sind bei Verwendung von Modell 2 wie erwartet mehr Ereignisse als komponentengruppenübergreifend einzustufen.

Diese obig erwähnten Ereignisse werden im Folgenden beschrieben. Kurze Beschreibungen der übrigen Ereignisse und Einschätzungen, wie diese gemäß den Modellen aus Kapitel 2.4 zu bewerten wären, finden sich in /STI 17/.

Ereignis 1:

Die Kompensatoren in den Ladeluftzuleitungen der Turbolader der Diesel enthalten Stützringe. Diese Ringe werden über eine Verbindungshülse an den jeweiligen Enden miteinander verbunden. Diese Hülse war bei diesem Ereignis nur lose aufgeschoben und nicht gesichert. Sie löste sich, geriet in den Turbolader und sorgte für Schäden am Laufrad. Die Ausfallart des Diesels war ein Betriebsversagen. Entsprechende Stützringe und Verbindungshülsen gibt es an D1- und D2-Dieseln. Im konkreten Fall zeigten sich auch bei weiteren Dieseln in beiden Komponentengruppen bereits lose oder fehlende Hülsen. Dieses Ereignis wird daher sowohl nach Modell 1 als auch nach Modell 2 als komponentengruppenübergreifend eingestuft. Das Ereignis wurde in zwei verschiedenen Einträgen der GVA Datenbank getrennt für die D1- und die D2-Diesel bewertet. Die Bewertung erfolgte durch insgesamt sechs Experten, die den Schädigungsvektor bei beiden Datenbankeinträgen jeweils identisch einschätzten: Der Schaden an den D2-Dieseln wurde von den beteiligten Experten als ein Ausfall, zwei schwache Schädigungen und eine sehr schwache Schädigung bewertet. Der GVA wurde als voll übertragbar angesehen (Übertragbarkeitsfaktor = 1). Der Schaden an den D1-Dieseln

wurde von den beteiligten Experten als vier sehr schwache Schädigungen bewertet. Der GVA wurde ebenfalls als voll übertragbar angesehen (Übertragbarkeitsfaktor = 1). Die Komponentengruppengröße beträgt in beiden Fällen offensichtlich vier. Gemäß dem in Abschnitt 2.5 beschriebenen Vorgehen wurde aus diesen Bewertungen folgende Bewertungen für einen komponentengruppenübergreifenden Ausfall abgeleitet:

Tab. 2.3 Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü1 aus den bestehenden Expertenbewertungen der Ereignisse E1a und E1b

Ereignis	Experten	Ausgef.	Schäd.	Schw. Schäd.	S. schw. Schäd.	KGG	Üf
E1a	GRS 1-4, 9, 10	1	0	2	1	4	1
E1b	GRS 1-4, 9, 10	0	0	0	4	4	1
↓							
Ü1	GRS 1-4, 9, 10	1	0	2	5	8	1

Ereignis 2:

Während einer WKP wird auf Grund eines Kühlwasserverlusts der Diesel per Hand während des Betriebs abgeschaltet um einer vorrangigen Aggregateschutzauflösung zuvorzukommen. Im Bereich einer Schweißnaht im Kühlwasserkreislauf in der Nähe des Turboladers war es auf Grund von Lochkorrosion bei ungünstiger Wasserchemie zu einer Leckage gekommen. Vergleichbare Befunde fanden sich an allen Dieseln auf der Anlage mit unterschiedlichem Schädigungsfortschritt. Es wurde deshalb die betroffenen Rohre getauscht und die Wasserchemie auf Deionat und einen anderen Kühlmittelzusatz geändert. Bei dem Ausfall handelt es sich um ein Betriebsversagen. Da die Korrosionsphänomene an den D1- und D2-Dieseln auftraten, wird dieses Ereignis sowohl gemäß Modell 1 als auch gemäß Modell 2 als komponentengruppenübergreifend eingestuft. Auf Grund des geringen Schädigungsfortschritts an den D2-Dieseln wurde das Ereignis in der GVA-Datenbank nur für die D1-Diesel durch insgesamt fünf GRS-Experten bewertet. Dabei wurde von allen Experten ein Diesel als ausgefallen bewertet und drei als schwach beschädigt. Der GVA wurde als voll übertragbar angesehen (Übertragbarkeitsfaktor = 1). Gemäß dem in Abschnitt 2.5 beschriebenen Vorgehen wurde aus diesen Bewertungen folgende Bewertungen für einen komponentengruppenübergreifenden Ausfall abgeleitet:

Tab. 2.4 Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü2 aus den bestehenden Expertenbewertungen des Ereignisses E2

Ereignis	Experten	Ausgef.	Schäd.	Schw. Schäd.	S. schw. Schäd.	KGG	Üf
E2	GRS 1, 3, 5, 6, 16	1	0	3	0	4	1
↓							
Ü2	GRS 1, 3, 5, 6, 16	1	0	3	4	8	1

Ein Experte bewertete dabei die schwache Schädigung mit einer ereignisspezifischen Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,3. Da es sich hier nicht um ein komponentengruppenübergreifendes Ereignis handelt, dass aus mehreren bestehenden Ereignissen kombiniert wird, konnte diese ereignisspezifische Ausfallwahrscheinlichkeit ohne Probleme in die neue Bewertung übernommen werden.

Ereignis 3:

Auf Grund von Fehlhandlungen im Rahmen von Prüfungen im Reaktorschutzsystem und missverständlichen Prüfanweisungen wäre es im Anforderungsfall Notstromfall für 15h nicht zum Start der D1- oder D2-Diesel gekommen. Die Diesel hätten von Hand gestartet werden müssen. Da dies beide Dieselgruppen betraf, wird der Ausfall als grundsätzlich sowohl nach Modell 1 als auch nach Modell 2 komponentengruppenübergreifend eingestuft. Bei der Bewertung dieses Ausfalls wurde durch die beiden bewertenden GRS-Experten drei Randbedingungen eingeführt. Erstens Leistungsbetrieb (bzw. Anlagenzustände nach Anfahrprüfung), auf diesen Anlagenzustand ist das Ereignis nicht übertragbar (Übertragbarkeitsfaktor = 0). Zweitens Anlagenzustand Revision, wobei gleichzeitige Arbeiten im mehreren Redundanzen nicht durch das BFS unterbunden sind, auf diesen Anlagenzustand ist das Ereignis voll übertragbar (Übertragbarkeitsfaktor = 1). Allerdings kommt dieser Anlagenzustand bei moderner Betriebsführung de facto nicht mehr vor. Drittens wurde der Anlagenzustand Revision, wobei gleichzeitige Arbeiten im mehreren Redundanzen durch das BFS unterbunden sind, als Anlagenzustand betrachtet. Hierbei sah ein Experte einen Übertragbarkeitsfaktor von 0,01 (um die Wahrscheinlichkeit auszudrücken, dass es trotz der Verriegelung im BFS unbeabsichtigt zu Arbeiten in mehreren Redundanten kommt). Der andere Experte sah keine Übertragbarkeit. Es wurden jeweils alle Diesel als mit der Ausfallart „Startet nicht“ ausgefallen bewertet.

Für die Auswertung wäre im Prinzip die erste Randbedingung „Leistungsbetrieb“ zu wählen. Dies hat allerdings zur Folge, dass das Ereignis de facto keinen Beitrag zur Ausfallwahrscheinlichkeit liefert, da der Übertragbarkeitsfaktor Null ist. Dieser Ansatz wurde für die Rechnung mit dem Modell 2 verfolgt. Ereignis 3 liefert hier folgerichtig keinen Beitrag zum Ergebnis.

Für die Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten mit dem Modell 1 wurde stattdessen die dritte Randbedingung „Anlagenzustand Revision, wobei gleichzeitige Arbeiten im mehreren Redundanzen durch das BFS unterbunden sind“ gewählt, da ansonsten bedingt durch die harten Auswahlkriterien des Modells keine Ereignisse mit der Ausfallart „Startet nicht“ vorhanden wären und somit, da das Kopplungsmodell keine Berechnung mit einer Nullfehlerstatistik ermöglicht, keine Ausfallwahrscheinlichkeiten für diese Ausfallart berechnet werden könnten.

Gemäß dem in Abschnitt 2.5 beschriebenen Vorgehen wurde aus den Expertenbewertungen folgende Bewertungen für einen komponentengruppenübergreifenden Ausfall unter Verwendung von Modell 1 und der Randbedingung „Anlagenzustand Revision, wobei gleichzeitige Arbeiten im mehreren Redundanzen durch das BFS unterbunden sind“ abgeleitet:

Tab. 2.5 Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü3 aus den bestehenden Expertenbewertungen der Ereignisse E3a und E3b

Ereignis	Experten	Ausgef.	Schäd.	Schw. Schäd.	S. schw. Schäd.	KGG	Üf
E3a	GRS 1	4	0	0	0	4	0,01
E3a	GRS 6	4	0	0	0	4	0
E3b	GRS 1	4	0	0	0	4	0,01
E3b	GRS 6	4	0	0	0	4	0
↓							
Ü3	GRS 1	8	0	0	0	8	0,01
Ü3	GRS 6	8	0	0	0	8	0

Ereignis 4:

Im Verlaufe zweier Jahre kam es wiederholt zu Signaleinkopplungen in der Instrumentierung der Notstromdiesel einer Anlage. Dabei wurden jeweils dem Reaktorschutz vor-

rangige Aggregateschutzkriterien fehlerhaft angeregt, die eine Inbetriebnahme des Diesels verhindert bzw. im Betrieb zu einer fehlerhaften Abschaltung geführt hätten. Die Ursachen für die Fehlanregungen waren unterschiedlich. Teilweise ließ sich die Ursache auf Schalthandlungen im Hochspannungsbereich oder Kurzschlüsse eingrenzen. Teilweise wurden lediglich nicht spezifikationsgemäß ausgeführte Erdverbindungen festgestellt ohne dass ein konkreter ereignisauslösender Störeinfluss identifiziert werden konnte. In jedem Falle wurde die Schirmung der betroffenen Kabelbereiche optimiert.

Von den einzelnen Ereignissen war zwar jeweils nur eine der beiden Dieselgruppen betroffen. Da insgesamt aber beide Dieselgruppen in einem relativ knappen Zeitraum Defizite in der Schirmung aufwiesen und auch jeweils davon ausgegangen werden muss, dass diese bereits für längere Zeit vorlagen, wird angenommen, dass beide Dieselgruppen gleichzeitig durch Einkopplungen in ihrer Betriebsbereitschaft beeinträchtigt waren. Die Ereignisse werden daher bei Verwendung von Modell 2 als potentiell komponentengruppenübergreifend betrachtet, nicht aber bei Verwendung von Modell 1. Hinsichtlich der Bewertung der Ausfallart zeigte sich, dass die GVA-Ereignisse teilweise als „Startet nicht“, teilweise als „Betriebsversagen“ bewertet wurden. Beides ist grundsätzlich plausibel. Eine Bewertung als „Startet nicht“ impliziert, dass es kurz vor einem auslösenden Ereignis zu einer Einkopplung kommt, so dass auf Grund der anstehenden vorrangigen Aggregateschutzsignale die Startanforderung aus dem Reaktorschutz nicht umgesetzt werden kann. Eine Bewertung als „Betriebsversagen“ impliziert, dass es während des Betriebs der Notstromdiesel zu einer Einkopplung und damit zu einer fehlerhaften Abschaltung der bis dahin laufenden Diesel kommt. Letzteres Szenario wird als das deutlich Wahrscheinlichere angesehen, so dass die komponentengruppenübergreifende Bewertung für die Ausfallart „Betriebsversagen“ erfolgt.

Insgesamt bewertete lediglich ein Experte alle Ereignisse, die hier in einem komponentengruppenübergreifenden Ereignis zusammengefasst werden. Folglich kann für die komponentengruppenübergreifende Bewertung auch nur ein Experte herangezogen werden. Insgesamt wurden drei GVA-Ereignisse mit Einkopplungen in der Anlage beobachtet. Eines fand an den Notstromdieseln statt, zwei an den Notstanddieseln. Bei den Ereignissen an Notstanddieseln wird konservativ das Ereignis mit den stärker ausgeprägten Schädigungen für die Synthese eines neuen Schädigungsvektors herangezogen. Da die betrachteten Ereignisse allerdings über mehrere Monate verteilt stattfanden, ist die Gleichzeitigkeit des komponentengruppenübergreifenden Ereignis-

ses und damit der Übertragbarkeitsfaktor zu reduzieren. Wie in Abschnitt 2.6.3 beschrieben entfallen die zugehörigen Ereignisse daher nicht für die Berechnung der normalen GVA, sondern erhalten dort einen nach Gleichung 2.9 angepassten Übertragbarkeitsfaktor.

Außerdem bewertete der einzige Experte, der beide Ereignisse bewertete, den Schädigungsgrad „Schwach beschädigt“ einmal mit einer experten- und ereignisspezifischen Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,05 und einmal mit der normalen Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,1. Es wird daher für das komponentengruppenübergreifende Ereignis eine Umgruppierung, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, vorgenommen. Die Komponenten, die als „schwach geschädigt“ mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,05 (niedriger als normal) bewertet wurden, werden beim komponentengruppenübergreifenden Ereignis als „sehr schwach geschädigt“ mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,05 (höher als normal) eingestuft. Dies ist möglich, da bei den einzelnen GVA-Ereignissen keine Komponenten als „sehr schwach geschädigt“ bewertet wurden.

Tab. 2.6 Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü4 aus den bestehenden Expertenbewertungen der Ereignisse E4a und E4b

Ereignis	Experten	Ausgef.	Schäd.	Schw. Schäd.	S. schw. Schäd.	KGG	Üf
E4a	GRS 1	1	0	2	0	3	1
E4b	GRS 1	1	0	1	0	2	1
↓							
Ü4	GRS 1	2	0	2	1	5	0,1

Ereignis 5:

Bei den Notstromdieseln einer Anlage wurde die Startfüllungsbegrenzung der Kraftstofffeinspritzmenge abhängig vom Öldruck aufgehoben. Dadurch erfolgte bei den Dieseln ein Hochlaufen bei voller Kraftstoffmenge was zu Drehzahleinbrüchen und in der Folge zu Abschaltungen auf Grund des Nichterreichens der Nenndrehzahl führte. Daraufhin wurde der Drehzahlregler so modifiziert, dass die Kraftstoffmengenbegrenzung abhängig von der erreichten Drehzahl aufgehoben wird. Es kam zwar nur an den Notstromdieseln zu Abschaltungen, die Änderungen wurden aber auch an den Notstandsdieseln durchgeführt. Daher wird davon ausgegangen, dass dieser Auslegungsfehler auch dort potentiell vorgelegen hat. Gemäß den Kriterien von Modell 2 ist dieses Er-

eignis daher komponentengruppenübergreifend, gemäß den Kriterien von Modell 1 nicht. Bewertet wurde der GVA nur für die Notstromdiesel durch insgesamt sechs GRS-Experten. Dabei wurde ein Diesel als „ausgefallen“ bewertet und die übrigen Drei als „sehr schwach geschädigt“. Das Ereignis wurde als voll übertragbar (Übertragbarkeitsfaktor = 1) für die Ausfallart „startet nicht“ bewertet. Entsprechend dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgehen werden die Notstandsdiesel für den komponentengruppenübergreifenden GVA auf Grund der grundsätzlichen Übertragbarkeit ebenfalls als sehr schwach geschädigt bewertet:

Tab. 2.7 Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü5 aus den bestehenden Expertenbewertungen des Ereignisses E5

Ereignis	Experten	Ausgef.	Schäd.	Schw. Schäd.	S. schw. Schäd.	KGG	Üf
E5	GRS 1-4, 9, 10	1	0	0	3	4	1
↓							
Ü5	GRS 1-4, 9, 10	1	0	0	5	6	1

2.8.3 Berechnung und Ergebnisse

Die GVA-Ausfallwahrscheinlichkeiten werden mit den Programmen POOL und PEAK berechnet. Dabei werden die in den Abschnitten 2.8.1 und 2.8.2 beschriebenen Änderungen in die Access-Datenbank, die POOL ausgibt, per Hand eingepflegt und anschließend mit PEAK importiert um aus den modifizierten Daten Ausfallwahrscheinlichkeiten für GVA und komponentengruppenübergreifende GVA berechnet.

2.8.3.1 Modell 1, Ausfallart: Betriebsversagen

Der komponentengruppenübergreifende GVA (ÜGVA) der D1- und D2-Diesel mit der Ausfallart „Betriebsversagen“ wird als GVA einer Komponentengruppe mit acht Komponenten berechnet. Die beobachteten Ereignisse sind die in Abschnitt 2.8.2 aufgeführten Ereignisse 1 und 2 mit den entsprechend modifizierten Expertenbewertungen. Die Beobachtungszeit beträgt 0,93 Jahre für die Ausfallart „Betriebsversagen“ wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet. Für die Ausfallart „Betriebsversagen“ werden Ausfallraten berechnet, eine Anpassung der Fehlerentdeckungszeit entfällt daher (siehe Abschnitt 2.6.2). Tabelle 2.8 zeigt die aus PEAK exportierten Ergebnisse der Berechnungen für

die Ausfallart Betriebsversagen. In der Spalte „AFK“ sind die Ausfallkombinationen (2v8-ÜGVA bis 8v8-ÜGVA) angegeben.

Tab. 2.8 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für komponentengruppenübergreifende GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen mit dem Modell 1

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v8	2,23E-06	3,75E-05	2,57E-04	7,22E-05	1,02E-04
3v8	7,49E-07	2,08E-05	1,79E-04	4,68E-05	7,42E-05
4v8	1,23E-07	8,81E-06	1,14E-04	2,71E-05	5,23E-05
5v8	1,12E-08	2,49E-06	6,41E-05	1,39E-05	3,82E-05
6v8	5,57E-10	4,49E-07	2,71E-05	5,61E-06	1,92E-05
7v8	1,58E-11	4,42E-08	7,84E-06	1,83E-06	1,00E-05
8v8	2,28E-13	2,04E-09	1,06E-06	3,31E-07	2,39E-06

Tabelle 2.9 zeigt zum Vergleich die GVA-Wahrscheinlichkeiten für „normale“ GVA der Ausfallart „Betriebsversagen“ in einer 8er-Gruppe. Als Datenbasis wurden hier alle Ereignisse dieser Ausfallart in Anlagen, in denen prinzipiell auch komponentengruppenübergreifende Ereignisse auftreten konnten, herangezogen. Somit ergeben sich insgesamt 13 zu berücksichtigende Ereignisse. Als Beobachtungszeit ergibt sich, wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet 1,72 Jahre.

Tab. 2.9 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 8er Komponentengruppe als Vergleichswerte

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v8	1,19E-05	1,37E-04	6,20E-04	2,02E-04	2,13E-04
3v8	1,03E-05	1,18E-04	5,42E-04	1,76E-04	1,87E-04
4v8	8,18E-06	9,39E-05	4,50E-04	1,44E-04	1,57E-04
5v8	5,86E-06	7,14E-05	3,63E-04	1,13E-04	1,28E-04
6v8	3,73E-06	4,94E-05	2,76E-04	8,31E-05	1,00E-04
7v8	1,63E-06	2,79E-05	2,00E-04	5,55E-05	7,87E-05
8v8	2,92E-07	9,19E-06	1,16E-04	2,80E-05	5,56E-05

Es zeigt sich, dass der Erwartungswert durch die detailliertere Modellierung mit dem Modell 1 im Vergleich zu normalen GVA einer 8er-Gruppe um einen Faktor von drei bis

100 sinkt. Dies war zu erwarten. Dieses Verhalten ist einerseits auf die geringere Anzahl an Ereignissen zurückzuführen. Diese werden durch die Einteilungskriterien verursacht, die Ereignisse ohne Schäden in beiden Gruppen stets als prinzipiell nicht übergreifend einstufen. Zwar sinkt gleichzeitig die Beobachtungszeit, da statt beiden Dieselgruppen nur die verallgemeinerte Komponentengruppe zur Beobachtungszeit beitragen kann. Allerdings tragen auch Anlagen, die nur eine Dieselgruppe und einen zusätzlichen einzelnen Diesel besitzen, zur Beobachtungszeit für komponentengruppenübergreifende GVA bei. Diese können zur Beobachtungszeit für normale GVA ebenfalls nur die Beobachtungszeit dieser einen Dieselgruppe beitragen. Die Beobachtungszeit steigt daher nur um einen Faktor kleiner als Zwei und kann daher nicht die um ca. einen Faktor Sechs gesunkene Anzahl der Ereignisse kompensieren. Zudem handelt es sich bei den nach Modell 1 als komponentengruppenübergreifend eingestuftten Ereignissen 1 und 2 um Ereignisse, die insgesamt eher geringe Auswirkungen mit lediglich einem Ausfall und ansonsten ausschließlich schwachen oder sehr schwachen Schädigungen aufweisen. Gleichzeitig sinkt auch die Standardabweichung, aber nicht im gleichen Maße wie der Erwartungswert.

Die Annahme komponentengruppenübergreifender Ausfälle beeinflusst auch die Wahrscheinlichkeiten mit denen normale GVA auftreten, da GVA-Ereignisse, die komponentengruppenübergreifende Ausfälle verursachen, aus der Menge der beobachteten Ereignisse, die normale GVA verursachen, herausfallen. Tabelle 2.10 zeigt die normale GVA-Wahrscheinlichkeiten der Notstromdiesel unter Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen. Bei den diesen Zahlen zu Grunde liegenden Ereignissen handelt es sich um die GVA-Ereignisse aus der GVA-Datenbank mit der Ausfallart Betriebsversagen ohne die Ereignisse 1 und 2, die in Abschnitt 2.8.2 als komponentengruppenübergreifend identifiziert wurden und ohne die Ereignisse aus Anlagen mit nur einer Dieselgruppe. Die Anzahl der GVA-Ereignisse beträgt daher zehn (13 Ereignisse aus Anlagen, in denen grundsätzlich komponentengruppenübergreifende Ereignisse auftreten können, minus die drei Ereignisse aus denen in Abschnitt 2.8.2 komponentengruppenübergreifende Ereignisse abgeleitet wurden). Die Beobachtungszeit beträgt wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet 1,72 Jahre. Die Komponentengruppengröße ist vier, da normale GVA nur eine Dieselgruppe betreffen.

Tab. 2.10 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 4er Komponentengruppe unter gleichzeitiger Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA mit dem Modell 1

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v4	1,20E-05	1,35E-04	6,24E-04	2,03E-04	2,16E-04
3v4	6,88E-06	8,56E-05	4,36E-04	1,36E-04	1,56E-04
4v4	2,19E-06	3,46E-05	2,48E-04	6,91E-05	1,05E-04

Um die Auswirkungen der Annahme komponentengruppenübergreifender GVA zu illustrieren, wurden außerdem GVA-Wahrscheinlichkeiten für eine Gruppe von Notstromdieseln ohne die Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen berechnet. Diese sind in Tabelle 2.11 aufgeführt. Analog zu Tabelle 2.9 besteht die Datenbasis aus 13 Ereignissen, die Beobachtungszeit beträgt wieder 1,72 Jahre. Die Komponentengruppengröße ist vier, da diese GVA nur eine Dieselgruppe betreffen.

Tab. 2.11 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 4er Komponentengruppe ohne Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA als Vergleichswerte

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v4	1,53E-05	1,76E-04	7,89E-04	2,59E-04	2,69E-04
3v4	9,09E-06	1,08E-04	5,33E-04	1,69E-04	1,90E-04
4v4	3,06E-06	4,47E-05	2,97E-04	8,42E-05	1,18E-04

Es zeigt sich, dass die Erwartungswerte bei Annahme komponentengruppenübergreifender Ausfälle um knapp 20% sinken. Dies war zu erwarten, da sich die Anzahl der Ereignisse verringerte.

2.8.3.2 Modell 1, Ausfallart: Startet nicht

Für diese Ausfallart gibt es lediglich ein beobachtetes Ereignis, das in Abschnitt 2.8.2 beschriebene Ereignis 3. Die Beobachtungszeit für komponentengruppenübergreifende Ausfälle der Ausfallart „Startet nicht“ beträgt 338,39 Jahre wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet. Für die Ausfallart „Startet nicht“ beträgt die Fehlerentdeckungszeit gemäß den Überlegungen aus Abschnitt 2.6.2 eine Woche oder 168 Stunden, da wöchentlich je ein D1- und ein D2-Diesel geprüft werden. Tabelle 2.11 zeigt die aus PEAK exportier-

ten Ergebnisse der Berechnungen für die Ausfallart „Startet nicht“. Dabei ist zu beachten, dass als Randbedingung der Anlagenzustand „Revision, wobei gleichzeitige Arbeiten im mehreren Redundanzen durch Verriegelungen im BFS unterbunden sind“ gewählt wurde. Die Ergebnisse sind also nicht auf den Leistungsbetrieb übertragbar. Für den Leistungsbetrieb können keine Zahlen berechnet werden, da das einzige beobachtete Ereignis nicht auf den Leistungsbetrieb übertragbar ist und das Kopplungsmodell keine Nullfehlerstatistik berechnen kann.

Tab. 2.12 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für komponentengruppenübergreifende GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht mit dem Modell 1

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v8	0,00E+00	0,00E+00	1,24E-10	2,60E-10	4,21E-09
3v8	0,00E+00	0,00E+00	1,45E-09	1,14E-09	1,28E-08
4v8	0,00E+00	0,00E+00	1,05E-08	4,02E-09	3,21E-08
5v8	0,00E+00	0,00E+00	4,99E-08	1,16E-08	6,53E-08
6v8	0,00E+00	0,00E+00	1,66E-07	3,14E-08	1,25E-07
7v8	0,00E+00	0,00E+00	4,46E-07	8,55E-08	2,44E-07
8v8	0,00E+00	0,00E+00	1,50E-06	2,95E-07	7,41E-07

Bei den Ergebnissen fallen zwei ungewöhnliche Sachverhalte ins Auge: Erstens sind die 5% und 50% Quantile der Ergebnisverteilung Null. Die Ursache hierfür ist, dass einer der beiden bewertenden Experten das Ereignis auch unter diesen Randbedingungen als nicht übertragbar eingestuft hat, so dass im Monte-Carlo-Verfahren bei der Hälfte der Rechenläufe die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines GVA-Phänomens gleich Null ist. Zweitens fällt auf, dass die Erwartungswerte für höhere Ausfallkombinationen konsistent größer sind als für niedrigere Ausfallkombinationen. Üblich ist ein genau umgekehrtes Verhalten. Dies ergibt sich daraus, dass der Schädigungsvektor des einzigen Ereignisses einen vollständigen Ausfall aller Komponenten darstellt, der Interpretationsvektor hat daher lediglich in dem Element, das für einen totalen Ausfall aller beteiligten Komponenten steht, eine Eins stehen und besteht ansonsten aus Nullen. Für die A Posteriori Wahrscheinlichkeitsdichte des Kopplungsparameters ergibt sich dementsprechend:

$$p(\eta_j) = \frac{\Gamma(9)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{17}{2}\right)} \eta_j^{\frac{17}{2}} (1 - \eta_j)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Kopplungsparameter größer als 0.95 ist beträgt mit dieser Wahrscheinlichkeitsdichte beispielsweise knapp über 64%. Es ist daher zu erwarten, dass die meisten Rechenläufe des Monte-Carlo-Verfahrens, die nicht auf Grund fehlender Übertragbarkeit Null als Ergebnis haben, hohe Kopplungsparameter ziehen und somit mit höherer Wahrscheinlichkeit hohe Ausfallkombinationen produzieren.

Tabelle 2.13 zeigt zum Vergleich die GVA-Wahrscheinlichkeiten für „normale“ GVA der Ausfallart „Startet nicht“ in einer 8er-Gruppe. Als Datenbasis wurden hier alle Ereignisse dieser Ausfallart in Anlagen, in denen prinzipiell auch komponentengruppenübergreifende Ereignisse auftreten konnten, herangezogen. Somit ergeben sich insgesamt 15 zu berücksichtigende Ereignisse. Als Beobachtungszeit ergibt sich, wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet 625,27 Jahre. Die Fehlerentdeckungszeit beträgt wieder 168 Stunden.

Tab. 2.13 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 8er Komponentengruppe als Vergleichswerte

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v8	4,30E-06	5,13E-05	2,37E-04	7,67E-05	8,18E-05
3v8	3,92E-06	4,52E-05	2,14E-04	6,87E-05	7,37E-05
4v8	3,25E-06	3,86E-05	1,85E-04	5,91E-05	6,45E-05
5v8	2,58E-06	3,14E-05	1,58E-04	5,00E-05	6,93E-05
6v8	1,93E-06	2,49E-05	1,36E-04	4,11E-05	4,90E-05
7v8	1,48E-06	2,06E-05	1,22E-04	3,61E-05	4,91E-05
8v8	1,11E-06	1,99E-05	1,53E-04	4,12E-05	6,15E-05

Es zeigt sich, dass der Erwartungswert durch die detailliertere Modellierung mit dem Modell 1 im Vergleich zu normalen GVA einer 8er-Gruppe um mehrere Zehnerpotenzen sinkt. Dies war aus den bereits bei der Ausfallart „Betriebsversagen“ genannten Gründen zu erwarten: Die Anzahl der Ereignisse sinkt deutlich stärker als die Beobachtungszeit. Da es sich bei dem einzigen nach Modell 1 komponentengruppenübergreifenden Ereignis um ein Ereignis mit extrem schwacher Übertragbarkeit handelt (durchschnittlicher Übertragbarkeitsfaktor 0,005) sinken die Erwartungswerte noch deutlich stärker als dies bei der Ausfallart „Betriebsversagen“ der Fall war. Insgesamt ist außerdem noch zu berücksichtigen, dass die Zahlen für komponentengruppenübergreifende Ausfälle nur für die Randbedingung „Revision, wobei gleichzeitige Arbeiten im mehreren Redundanzen durch das BFS unterbunden sind“ gelten. Für den Leistungsbetrieb

sind nach Modell 1 keine komponentengruppenübergreifenden Ereignisse beobachtet worden. Daher können auch keine GVA-Wahrscheinlichkeiten mit dem Kopplungsmodell berechnet werden.

Wie bei der Ausfallart „Betriebsversagen“ beeinflusst die Annahme komponentengruppenübergreifender Ausfälle auch bei der Ausfallart „Startet nicht“ die Wahrscheinlichkeiten mit denen normale GVA auftreten, da GVA-Ereignisse, die komponentengruppenübergreifende Ausfälle verursachen, aus der Menge der beobachteten Ereignisse, die normale GVA verursachen, herausfallen. Tabelle 2.14 zeigt die normale GVA-Wahrscheinlichkeiten der Notstromdiesel unter Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen. Bei den diesen Zahlen zu Grunde liegenden Ereignissen handelt es sich um die GVA-Ereignisse aus der GVA-Datenbank mit der Ausfallart „Startet nicht“ ohne die Ereignisse, die in Abschnitt 2.8.2 als komponentengruppenübergreifend identifiziert wurden und ohne die Ereignisse aus Anlagen mit nur einer Dieselgruppe. Die Anzahl der GVA-Ereignisse beträgt daher 13 (15 Ereignisse aus Anlagen, in denen grundsätzlich komponentengruppenübergreifende Ereignisse auftreten können, minus die zwei Ereignisse aus denen in Abschnitt 2.8.2 ein komponentengruppenübergreifendes Ereignis abgeleitet wurden). Die Beobachtungszeit beträgt wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet 625,27 Jahre. Die Komponentengruppengröße ist vier, da normale GVA nur eine Dieselgruppe betreffen. Die Fehlerentdeckungszeit beträgt 336 Stunden, da die Komponenten einer 4er-Gruppe monatlich geprüft werden.

Tab. 2.14 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 4er Komponentengruppe unter gleichzeitiger Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA mit dem Modell 1

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v4	1,23E-05	1,39E-04	6,28E-04	2,07E-04	2,19E-04
3v4	7,51E-06	9,08E-05	4,47E-04	1,41E-04	1,59E-04
4v4	2,86E-06	4,21E-05	2,76E-04	7,89E-05	1,10E-04

Um die Auswirkungen der Annahme komponentengruppenübergreifender GVA zu illustrieren, wurden außerdem GVA-Wahrscheinlichkeiten für eine Gruppe von Notstromdieseln ohne die Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen berechnet. Diese sind in Tabelle 2.15 aufgeführt. Analog zu Tabelle 2.13 besteht die Datenbasis aus 15 Ereignissen. Die Beobachtungszeit beträgt wieder 625,27 Jahre, die Fehlerentdeckungszeit wieder 336 Stunden. Die Komponentengruppengröße ist

vier, da diese GVA nur eine Dieselgruppe betreffen. Es sei außerdem darauf hingewiesen, dass nach wie vor die Randbedingung „Revision, wobei gleichzeitige Arbeiten im mehreren Redundanzen durch Verriegelungen im BFS unterbunden sind“ gilt.

Tab. 2.15 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 4er Komponentengruppe ohne Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA als Vergleichswerte

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v4	1,25E-05	1,44E-04	6,56E-04	2,14E-04	2,26E-04
3v4	8,78E-06	1,06E-04	5,06E-04	1,62E-04	1,78E-04
4v4	6,54E-06	8,35E-05	4,81E-04	1,44E-04	1,98E-04

Es zeigt sich, dass die Erwartungswerte der GVA-Wahrscheinlichkeiten durch die Annahme komponentengruppenübergreifender GVA zwischen 3% und 45% sinken. Dabei sinken die Erwartungswerte der höheren Ausfallkombinationen stärker als die Erwartungswerte niedriger Ausfallkombinationen. Das grundsätzliche Phänomen der sinkenden Ausfallwahrscheinlichkeiten liegt nach wie vor in der verringerten Anzahl der Ereignisse begründet. Da es sich bei den entfallenen Ereignissen ausschließlich um Ereignisse mit sehr hohen Ausfallkombinationen, nämlich zwei vollständige Ausfälle, handelt, sinken die Wahrscheinlichkeiten hoher Ausfallkombinationen proportional stärker als niedrige Ausfallkombinationen.

2.8.3.3 Modell 2, Ausfallart: Betriebsversagen

Der komponentengruppenübergreifende GVA der D1- und D2-Diesel mit der Ausfallart „Betriebsversagen“ wird als GVA einer Komponentengruppe mit acht Komponenten berechnet. Die beobachteten Ereignisse sind die in Abschnitt 2.8.2 aufgeführten Ereignisse 1 und 2. Neu bei einer Auswertung nach Modell 2 kommt das in Abschnitt 2.8.2 beschriebene Ereignis 4 mit den dort aufgeführten Expertenbewertungen hinzu, so dass nun insgesamt drei Ereignisse die Datenbasis bilden. Die Beobachtungszeit beträgt, wie bei Modell 1, 0,93 Jahre für die Ausfallart „Betriebsversagen“, wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet. Für die Ausfallart „Betriebsversagen“ werden Ausfallraten berechnet, eine Anpassung der Fehlerentdeckungszeit entfällt daher (siehe Abschnitt 2.6.2). Tabelle 2.16 zeigt die aus PEAK exportierten Ergebnisse der Berechnungen für die Ausfallart Betriebsversagen.

Tab. 2.16 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für komponentengruppenübergreifende GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen mit dem Modell 2

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v8	2,66E-06	4,01E-05	2,61E-04	7,45E-05	1,01E-04
3v8	1,19E-06	2,36E-05	1,86E-04	4,99E-05	7,54E-05
4v8	4,90E-07	1,15E-05	1,19E-04	3,00E-05	5,38E-05
5v8	1,59E-07	4,91E-06	6,93E-05	1,63E-05	3,59E-05
6v8	2,92E-08	1,83E-06	3,32E-05	7,71E-06	2,06E-05
7v8	2,58E-09	4,73E-07	1,37E-05	3,18E-06	1,14E-05
8v8	1,07E-10	5,30E-08	4,06E-06	9,20E-07	4,08E-06

Wie bei Modell 1 sollen hier zu Vergleichszwecken die GVA-Wahrscheinlichkeiten für „normale“ GVA der Ausfallart „Betriebsversagen“ in einer 8er-Gruppe herangezogen werden. Diese sind in Tabelle 2.17 aufgelistet. Die Randbedingungen sind hierbei die gleichen wie bei Modell 1. Die Datenbasis sind alle Ereignisse dieser Ausfallart in Anlagen, in denen prinzipiell auch komponentengruppenübergreifende Ereignisse auftreten konnten. Insgesamt sind dies 14 Ereignisse. Die Beobachtungszeit beträgt wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet 1,72 Jahre. Die Datenbasis umfasst hier ein Ereignis mehr als mit Modell 1, da bei der Diskussion zu Ereignis 4 in Abschnitt 2.8.2 festgestellt wurde, dass die gleichartigen Einkopplungsereignisse in der Ausfallart auch gleichartig coordiert sein müssten und daher dementsprechend die Ausfallart dieser Ereignisse für die Auswertung konsequent auf Betriebsversagen geändert wurde.

Tab. 2.17 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 8er Komponentengruppe als Vergleichswerte

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v8	1,27E-05	1,43E-04	6,45E-04	2,13E-04	2,24E-04
3v8	1,10E-05	1,25E-04	5,69E-04	1,87E-04	1,96E-04
4v8	8,83E-06	1,04E-04	4,87E-04	1,58E-04	1,70E-04
5v8	6,71E-06	8,09E-05	4,01E-04	1,27E-04	1,41E-04
6v8	4,43E-06	5,82E-05	3,16E-04	9,60E-05	1,19E-04
7v8	2,22E-06	3,52E-05	2,32E-04	6,60E-05	1,00E-04
8v8	4,87E-07	1,31E-05	1,49E-04	3,65E-05	6,98E-05

Es zeigt sich, dass die Erwartungswerte bei der Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen nach dem Modell 2 um 65% (2v8) bis 97% (8v8) unter denen liegen, die bei Einsatz einer 8er Gruppe mit der normalen Datenbasis entstehen würden. Dies ist wieder der Tatsache geschuldet, dass die Anzahl der Ereignisse stärker ansteigt als die Beobachtungszeiten. Im Vergleich zu Modell 1 (Tabelle 2.8) sind die Erwartungswerte auf Grund des zusätzlichen Ereignisses in der Auswertung leicht gestiegen. Bei hohen Schädigungskombinationen fiel dieser Anstieg etwas ausgeprägter aus, da es sich bei dem neuen Ereignis 4 um ein Ereignis mit, im Vergleich zu den mit Modell 1 bereits betrachteten Ereignissen 1 und 2, stärkeren Schädigungen handelt.

Um den Einfluss der Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ereignissen auf die nicht-komponentengruppenübergreifenden GVA-Ausfallwahrscheinlichkeiten zu illustrieren, wurden die GVA-Ausfallwahrscheinlichkeiten der Notstromdiesel durch normale GVA unter Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA berechnet. Bei den diesen Zahlen zu Grunde liegenden Ereignissen handelt es sich um die GVA-Ereignisse aus der GVA-Datenbank mit der Ausfallart Betriebsversagen ohne die Ereignisse, die in Abschnitt 2.8.2 als komponentengruppenübergreifend identifiziert wurden und ohne die Ereignisse aus Anlagen mit nur einer Dieselgruppe. Die Anzahl der GVA-Ereignisse beträgt elf. (13 Ereignisse aus Anlagen, in denen grundsätzlich komponentengruppenübergreifende Ereignisse auftreten können, minus die drei Ereignisse aus denen in Abschnitt 2.8.2 die komponentengruppenübergreifenden Ereignisse 1 und 2 gebildet. Das komponentengruppenübergreifende Ereignis 4 ist nur mit einem geringen Übertragbarkeitsfaktor komponentengruppenübergreifend, daher verbleiben die zugehörigen Ereignisse mit einem entsprechend Gleichung 2.9 reduzierten Über-

tragbarkeitsfaktor in der Auswertung. Eines dieser Einkopplungsereignisse war vorher mit der Ausfallart „Startet nicht“ bewertet worden, daher erhöht sich die Anzahl der Ereignisse noch um eins.) Die Beobachtungszeit beträgt wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet 1,72 Jahre. Die Komponentengruppengröße ist vier, da normale GVA nur eine Dieselgruppe betreffen.

Tab. 2.18 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 4er Komponentengruppe unter gleichzeitiger Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA mit dem Modell 2

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v4	1,32E-05	1,50E-04	6,82E-04	2,24E-04	2,36E-04
3v4	8,08E-06	9,83E-05	4,89E-04	1,54E-04	1,73E-04
4v4	2,89E-06	4,34E-05	2,99E-04	8,41E-05	1,19E-04

Zu Vergleichszwecken wurden außerdem GVA-Wahrscheinlichkeiten für eine Gruppe von vier Notstromdieseln ohne die Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen berechnet. Diese sind in Tabelle 2.19 aufgeführt. Die Randbedingungen sind hierbei die gleichen wie bei Modell 1, die Anzahl der Ereignisse ist wie oben bereits diskutiert um eins größer, da die GVA-Ereignisse mit Einkopplungen in die Instrumentierung konsequent auf die wahrscheinlichere Ausfallart Betriebsversagen geändert wurden.

Tab. 2.19 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 4er Komponentengruppe ohne Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA als Vergleichswerte

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v4	1,70E-05	1,92E-04	8,47E-04	2,82E-04	2,89E-04
3v4	1,05E-05	1,25E-04	6,00E-04	1,92E-04	2,10E-04
4v4	4,00E-06	5,54E-05	3,51E-04	1,01E-04	1,36E-04

Es zeigt sich, dass Erwartungswerte für normale GVAs durch die Annahme Komponentengruppenübergreifender Ausfälle um ca. 20% verringert wird. Dies stellt einen etwa gleich starken Rückgang wie bei Modell 1 dar, obwohl nun ein zusätzliches Ereignis als komponentengruppenübergreifend klassifiziert wurde. Dies ist dadurch zu erklären, dass dieses Ereignis aber nur mit einem Übertragbarkeitsfaktor von 0,1 als

übergreifend klassifiziert wurde und daher im Vergleich zu der relativ großen Zahl an übrigen Ereignissen nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Im Gegensatz dazu ist der relative Einfluss auf die Ergebnisse für komponentengruppenübergreifende GVA größer, da dort die Anzahl der Ereignisse geringer ist.

2.8.3.4 Modell 2, Ausfallart: Startet nicht

Der komponentengruppenübergreifende GVA der D1- und D2-Diesel mit der Ausfallart „Startet nicht“ wird als GVA einer Komponentengruppe mit acht Komponenten berechnet. Die Beobachtungszeit für komponentengruppenübergreifende Ausfälle der Ausfallart „Startet nicht“ beträgt 338,39 Jahre wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet. Für die Ausfallart „Startet nicht“ beträgt die Fehlerentdeckungszeit gemäß den Überlegungen aus Abschnitt 2.6.2 eine Woche oder 168 Stunden da wöchentlich je ein D1- und ein D2-Diesel geprüft werden. Bei der Beispielrechnung mit Modell 1 für diese Ausfallart musste die Randbedingung „Revision, wobei gleichzeitige Arbeiten im mehreren Redundanzen durch Verriegelungen im BFS unterbunden sind“ gewählt werden, da es ansonsten keine Ereignisse gegeben hätte und mit dem Kopplungsmodell keine Nullfehlerstatistik berechnet werden kann. Da unter den geänderten Einstufungsbedingungen von Modell 2 mit Ereignis 5 nun ein Ereignis, das auf den Leistungsbetrieb übertragbar ist, vorhanden ist, wurde die Randbedingung fallen gelassen. Dadurch blieb Ereignis 5 das einzige zu berücksichtigende Ereignis. Es war allerdings ohnehin zu erwarten, dass der Beitrag von Ereignis 5 die Ergebnisse dominiert, da Ereignis 3, als potentiell zusätzliches Ereignis (unter Verwendung der Randbedingung) einen sehr niedrigen Übertragbarkeitsfaktor besitzt. Tabelle 2.20 zeigt die aus PEAK exportierten Ergebnisse der Berechnungen für die Ausfallart „Startet nicht“.

Tab. 2.20 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für komponentengruppenübergreifende GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht mit dem Modell 2

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v8	1,82E-07	6,77E-06	6,77E-05	1,70E-05	3,07E-05
3v8	2,57E-08	3,43E-06	4,93E-05	1,14E-05	2,29E-05
4v8	1,27E-09	1,17E-06	3,27E-05	6,91E-06	1,69E-05
5v8	3,65E-11	2,42E-07	1,85E-05	3,69E-06	1,19E-05
6v8	6,72E-13	2,99E-08	7,67E-06	1,65E-06	7,37E-06
7v8	6,63E-15	2,10E-09	2,01E-06	5,58E-07	3,84E-06
8v8	2,60E-17	6,37E-11	2,48E-07	1,14E-07	1,15E-06

Tabelle 2.21 zeigt zum Vergleich die GVA-Wahrscheinlichkeiten für „normale“ GVA der Ausfallart „Startet nicht“ in einer 8er-Gruppe. Als Datenbasis wurden hier alle Ereignisse dieser Ausfallart in Anlagen, in denen prinzipiell auch komponentengruppenübergreifende Ereignisse auftreten konnten, herangezogen. Im Gegensatz zu Modell 1 ergeben sich hier insgesamt nur zwölf zu berücksichtigende Ereignisse. Dies liegt erstens an dem Wegfall der Randbedingung. Die zwei GVA-Ereignisse aus denen in Abschnitt 2.8.2 komponentengruppenübergreifende Ereignis 3 abgeleitet wurde, fallen ohne die Randbedingung aus der Betrachtung heraus, da sie dann nicht mehr übertragbar sind. Zweitens wurde im Rahmen der Betrachtung von Ereignis 4 in Abschnitt 2.8.2 festgestellt, dass ein Ereignis, das bisher als startet nicht eingestuft wurde, technisch sinnvoller und um Konsistenz mit anderen Ereignissen herzustellen als Betriebsversagen zu betrachten ist. Als Beobachtungszeit ergibt sich, wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet 625,27 Jahre. Die Fehlerentdeckungszeit beträgt 168 Stunden.

Tab. 2.21 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 8er Komponentengruppe als Vergleichswerte

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v8	4,08E-06	4,67E-05	2,20E-04	7,07E-05	7,59E-05
3v8	3,55E-06	4,13E-05	1,92E-04	6,24E-05	6,70E-05
4v8	2,79E-06	3,38E-05	1,65E-04	5,25E-05	5,87E-05
5v8	2,03E-06	2,53E-05	1,32E-04	4,08E-05	4,76E-05
6v8	1,25E-06	1,72E-05	1,02E-04	3,00E-05	3,78E-05
7v8	5,39E-07	9,69E-06	7,51E-05	2,02E-05	3,32E-05
8v8	1,04E-07	3,25E-06	4,74E-05	1,11E-05	2,48E-05

Auch hier zeigt sich das bereits bekannte Verhalten, dass die Erwartungswerte der Ausfallkombinationen durch die Verwendung eines detaillierteren Modells zurückgehen, da die Ereignisanzahl stärker sinkt als die Beobachtungszeit. Ein direkter Vergleich mit den Zahlen aus dem Modell 1 erübrigt sich auf Grund der geänderten Randbedingungen.

Wie bei der Ausfallart „Betriebsversagen“ beeinflusst die Annahme komponentengruppenübergreifender Ausfälle auch bei der Ausfallart „Startet nicht“ die Wahrscheinlichkeiten mit denen normale GVA auftreten, da GVA-Ereignisse, die komponentengruppenübergreifende Ausfälle verursachen, aus der Menge der beobachteten Ereignisse, die normale GVA verursachen, herausfallen. Tabelle 2.22 zeigt die normale GVA-Wahrscheinlichkeiten der Notstromdiesel unter Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen. Bei den diesen Zahlen zu Grunde liegenden Ereignissen handelt es sich um die GVA-Ereignisse aus der GVA-Datenbank mit der Ausfallart „Startet nicht“ ohne die Ereignisse, die in Abschnitt 2.8.2 als komponentengruppenübergreifend identifiziert wurden und ohne die Ereignisse aus Anlagen mit nur einer Dieselgruppe. Die Anzahl der GVA-Ereignisse beträgt daher 11. 15 Ereignisse aus Anlagen, in denen grundsätzlich komponentengruppenübergreifende Ereignisse auftreten können, minus die drei Ereignisse, aus denen in Abschnitt 2.8.2 komponentengruppenübergreifende Ereignisse abgeleitet wurden (von denen Zwei allerdings auf Grund der geänderten Randbedingungen ohnehin keinen Beitrag liefern), minus ein Ereignis, für das die Ausfallart auf Betriebsversagen geändert wurde. Die Beobachtungszeit beträgt wie in Abschnitt 2.8.1 berechnet 625,27 Jahre. Die Komponentengruppengröße ist vier, da normale GVA nur eine Dieselgruppe betreffen. Die Fehlerentdeckungszeit beträgt daher 336 Stunden.

Tab. 2.22 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 4er Komponentengruppe unter gleichzeitiger Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA mit dem Modell 2

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v4	9,37E-06	1,10E-04	5,17E-04	1,66E-04	1,79E-04
3v4	5,71E-06	6,96E-05	3,58E-04	1,12E-04	1,29E-04
4v4	1,91E-06	2,93E-05	2,13E-04	5,88E-05	8,66E-05

Um die Auswirkungen der Annahme komponentengruppenübergreifender GVA zu illustrieren, wurden außerdem GVA-Wahrscheinlichkeiten für eine Gruppe von Notstromdieseln ohne die Annahme von komponentengruppenübergreifenden Ausfällen berechnet. Diese sind in Tabelle 2.23 aufgeführt. Analog zu Tabelle 2.21 besteht die Datenbasis aus 12 Ereignissen, die Beobachtungszeit beträgt wieder 625,27 Jahre. Die Komponentengruppengröße ist vier, da diese GVA nur eine Dieselgruppe betreffen. Die Fehlerentdeckungszeit beträgt daher 336 Stunden.

Tab. 2.23 Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 4er Komponentengruppe ohne Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA als Vergleichswerte

AFK	5%-Quantil	50%-Quantil	95%-Quantil	Erwartungswert	Standardabweichung
2v4	1,08E-05	1,23E-04	5,69E-04	1,85E-04	1,98E-04
3v4	6,48E-06	7,67E-05	3,93E-04	1,23E-04	1,41E-04
4v4	2,05E-06	3,12E-05	2,25E-04	6,25E-05	9,53E-05

Es zeigt sich, dass die Erwartungswerte der GVA-Ausfallkombinationen bei Annahme komponentengruppenübergreifender Ausfälle um 5-10% sinken. Dies ist durch das eine Ereignis, das bei Berücksichtigung komponentengruppenübergreifender GVA aus dem Betrachtungsumfang verschwindet, zu erklären.

2.9 Vergleich Kopplungsmodell – Alternative Modelle

Weiterhin wurde untersucht, ob das Kopplungsmodell im Vergleich zu anderen international üblichen Modellen besonders konservative Quantifikationsergebnisse liefert. Hierzu wurden folgende Modelle betrachtet:

- das Basic-Parameter-Modell

- das Alpha-Faktor Modell

Diese Modelle werden in im Folgenden kurz skizziert. Details u. A. zur Schätzung von Modellparametern sind z. B. in /STI 14/ zu finden.

2.9.1 Basic-Parameter-Modell

Beim Basic-Parameter-Modell sind die Wahrscheinlichkeiten eines Ausfalls von k von r Komponenten¹ $Q_{k \setminus r}$ unmittelbar die Modellparameter.

2.9.2 Alpha-Faktor-Modell

Das Alpha-Faktor-Modell ist das derzeit international am weitesten verbreitetste Modell zur Schätzung von Nicht-Verfügbarkeiten durch GVA aus der Betriebserfahrung. Im Alpha-Faktor-Modell werden die Anteile der Wahrscheinlichkeit eines (k von r)-Ausfalls an der Wahrscheinlichkeit q_{BE} eines beliebigen Ereignisses (Einzelausfall oder Ausfall mehrerer Komponenten) als Modellparameter verwandt. Anders ausgedrückt, sind die Modellparameter:

$\alpha_{k \setminus r}$ Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis ein (k von r)-GVA ist ($k \geq 1$)

q_{BE} Wahrscheinlichkeit eines beliebigen Ereignisses

Für die Parameter $\alpha_{k \setminus r}$ gilt:

$$\sum_{k=1}^r \alpha_{k \setminus r} = 1 \quad (2.12)$$

Die Wahrscheinlichkeiten eines (k von r)-GVA $q_{k \setminus r}$ können mit Hilfe von $\alpha_{k \setminus r}$ und der Wahrscheinlichkeit q_{BE} eines beliebigen Ereignisses beschrieben werden als:

¹ In diesem Bericht werden Nichtverfügbarkeiten durch GVA, die sich auf eine bestimmte Menge ausgefallene Komponenten beziehen, durch ein groß geschriebenes Q , während sich Nichtverfügbarkeiten durch GVA, die sich nur auf eine bestimmte Anzahl beziehen, durch ein klein geschriebenes q bezeichnet werden. Diese Größen stehen in folgender Beziehung: $q_{k \setminus r} = \binom{r}{k} Q_{k \setminus r}$

$$q_{k \setminus r} = \alpha_{k \setminus r} q_{BE} \quad (2.13)$$

Diese Gleichung ist für $k \in \{1, \dots, r\}$ gültig.

Es ist anzumerken, dass das Basic-Parameter-Modell und das Alpha-Faktor Modell nur Parametrisierungen desselben Modells sind. Allerdings werden für die jeweiligen Modellparameter a-priori-Verteilungen gewählt, die unterschiedlich sind. Somit ergeben sich für eine endliche Menge an Betriebserfahrung unterschiedliche Ergebnisse (siehe u.a. /STI 14/).

2.9.3 Ergebnisse des Modellvergleichs

Im Gegensatz zum Kopplungsmodell gestatten die alternativen Modelle eine Übertragung der Betriebserfahrung zwischen Komponentengruppen verschiedener Größe (so genanntes Mapping) nicht. Um dennoch einen Vergleich zu ermöglichen, wurde ein spezieller Datensatz zusammengestellt, der nur die Betriebserfahrung von Anlagen mit vier D1- und vier D2-Dieseln beinhaltet. Die Einstufung als komponentengruppenübergreifender GVA erfolgt gemäß Modell 2 aus Abschnitt 2.4. Es werden Zahlen für die Ausfallart „Betriebsversagen“ berechnet.

Dadurch verblieben als komponentengruppenübergreifende GVA die Ereignisse 1 und 2 aus Abschnitt 2.8.2. Die Ereignisse 4 und 5 ereigneten sich nicht in Anlagen mit acht Dieseln. Ereignis 3 entfällt auf Grund der nicht gegebenen Randbedingungen und der falschen Ausfallart. Es ergibt sich mit den Daten aus Abschnitt 2.8.1 eine Beobachtungszeit von 0,51 Jahren.

Die zur Anwendung des Alpha-Faktor-Modells erforderliche Anzahl von Einzelausfällen wurde mithilfe der Ergebnisse der Zentralen Zuverlässigkeits- und Ereignisdatenbank (ZEDB) des VGB /VGB 12/ abgeschätzt, indem die Gesamtbeobachtungszeit mit dem Erwartungswert der Ausfallrate multipliziert wurde.

Dann wurde sowohl der Schätzalgorithmus des Kopplungsmodells als auch die Schätzalgorithmen der alternativen Modelle mit Berücksichtigung der Schätzunsicherheit (siehe z. B. /NRC 89/) durch Bayes'sche Verfahren angewandt und die Nichtver-

fügarkeiten quantifiziert. Die Schätzalgorithmen liegen als Wolfram Mathematica-Code vor.

Es zeigte sich, dass das Alpha-Faktor-Modell und Basic-Parameter-Modell vergleichbare Ergebnisse lieferten, während das Kopplungsmodell weniger konservativ als alternative Modelle war. Dies ist am Beispiel der Ausfallart „Betriebsversagen“ in Tabelle 2.24 dargestellt.

Tab. 2.24 Nichtverfügbarkeit durch Übergreifende GVA, Leistungsbetrieb, Betriebsversagen, Erwartungswerte der Ausfallrate in 1/h

AFK	2\8	3\8	4\8	5\8	6\8	7\8	8\8
Koppl.-Mod.	1,4E-04	9,1E-05	5,2E-05	2,7E-05	1,1E-05	3,5E-06	6,4E-07
Basic-Param.	2,4E-04	1,4E-04	1,2E-04	1,2E-04	1,2E-04	1,2E-04	1,2E-04
Alpha-Faktor	2,3E-04	1,3E-04	1,1E-04	1,1E-04	1,1E-04	1,1E-04	1,1E-04

Dieses Ergebnis lässt sich wie folgt erklären. Das Kopplungsmodell beinhaltet eine Modellannahme, die die verschiedenen Ausfallkombinationen in Beziehung setzt:

Es wird angenommen, dass bei Auftreten eines GVA-Phänomens die einzelnen Komponenten unabhängig voneinander mit einer phänomenspezifischen Wahrscheinlichkeit η_j ausfallen:

$$p(k|r|\eta_j) = \binom{r}{k} \eta_j^k (1 - \eta_j)^{r-k} \quad (2.14)$$

Bei einer Komponentengruppengröße 8 ist die Schätzunsicherheit des Kopplungsparameters nicht mehr sehr groß. Da beide ÜGVA-Ereignisse mit nur einem Ausfall und ohne beschädigte Komponenten bewertet wurden, ist die Wahrscheinlichkeit eines hohen Kopplungsparameters gering und hohe Ausfallkombinationen sind somit deutlich unwahrscheinlicher als niedrige.

Demgegenüber gibt es beim Basic-Parameter-Modell bzw. dem Alpha-Faktor-Modell keine solche Annahme. Die Raten für die verschiedenen Ausfallkombinationen werden ohne Bezug zu anderen Ausfallkombination geschätzt. Deshalb sind die Schätzergebnisse der Ausfallkombinationen ab 4 von 8 praktisch gleich, da sie durch die a priori-Verteilung bestimmt sind (Nullfehlerstatistik).

3 Entwicklung einer Modellierungsmethode für übergreifende GVA, die sehr viele Komponenten betreffen können

3.1 Motivation

Wie bereits in /LEB 15/ und in Abschnitt 2.7 diskutiert, wächst die Anzahl der Basisereignisse, die im Fehlerbaum zur Modellierung von GVA benötigt werden, mit der Größe der Komponentengruppe exponentiell an. Es gilt

$$N_{BE} = 2^n - n - 1, \quad (3.1)$$

wobei N_{BE} die Anzahl der Basisereignisse und n die Komponentengruppengröße bezeichnen. Deshalb kommt die oben beschriebene Vorgehensweise, bei der für verallgemeinerte Komponentengruppen alle GVA-Ereignisse als Basisereignisse im Fehlerbaum modelliert werden, nur bis zu einer Größe der verallgemeinerten Komponentengruppe von maximal etwa 10 infrage. In diesem Fall sind 1013 Basisereignisse in Modell vorzusehen.

Allerdings sind bei einer umfassenden Modellierung von übergreifenden GVA auch verallgemeinerte Komponentengruppen zu berücksichtigen, die wesentlich größer sind, z. B. um einen gemeinsamen Ausfall von gleichartigen Schaltern, die als Betriebsmittel verschiedener Komponenten bzw. als Kuppelschalter zwischen verschiedenen Schienen eingesetzt werden, modellieren zu können. Analysen einer modernen deutschen Druckwasserreaktoranlage haben ergeben, dass aufgrund gleichartiger Schalter GVA von 28 Komponenten im Modell abgebildet werden müssen (siehe /STI 15/). Hierfür ergäbe sich eine Anzahl von $N_{BE} = 2,7 \cdot 10^8$ Basisereignissen.

Somit ist es erforderlich, zur Einbeziehung solcher GVA andere Ansätze zu entwickeln.

3.2 Erster Ansatz

Im Folgenden soll der Ansatz verfolgt werden, die übergreifenden GVA nicht explizit im PSA-Modell abzubilden, sondern sie vielmehr bei der Quantifizierung des Modells zu berücksichtigen. Basis ist der Gedanke, dass übergreifende GVA als Korrelationen von GVA bzw. von GVA und Einzelausfällen angesehen werden können. Wenn diese Kor-

relationen bei der Quantifizierung mathematisch korrekt einbezogen werden, so sind die übergreifenden GVA berücksichtigt.

Dies wird anhand des Beispiels eines Minimalschnitts c dargestellt. Die Nichtverfügbarkeit $q(c)$ ist

$$q(c) = \prod_{\text{Basisereignisse } b \in c} q(b) \quad (3.2)$$

wobei $q(b)$ die Wahrscheinlichkeit, dass Basisereignis b eintritt, bezeichnet. Die Nichtverfügbarkeiten der Minimalschnitte dienen zur Quantifizierung der Fehler/Ereignisbäume.

So lässt sich z. B. bei Verwendung der Näherung der seltenen Ereignisse die Wahrscheinlichkeit des TOP-Ereignisses berechnen als Summe der Nichtverfügbarkeiten der einzelnen Minimalschnitte

$$q^*(TOP) = \sum_{\text{Minimalschnitte } c \in C} q(c) \quad (3.3)$$

wobei C die Menge der Minimalschnitte des TOP-Ereignisses bezeichnet.

In der Praxis kommen weiterentwickelte Verfahren zum Einsatz (siehe z.B. /SCA 12/). Auch bei Verfahren höherer Ordnung bleibt die grundlegende Struktur von dieser Gleichung erhalten. Die Ergebnisse lassen sich als Funktion von Nichtverfügbarkeiten $q(c)$ beschreiben:

$$q^*(TOP) = \sum_{\text{Schnitte } c \in \hat{C}} f(c) q(c) \quad (3.4)$$

wobei z. B. bei einem Verfahren zweiter Ordnung \hat{C} die Menge aller Schnitte ist, die als Vereinigungsmenge von maximal 2 Minimalschnitten darstellbar sind, und $f(c)$ gegeben ist durch

$$f(c) = \begin{cases} 1 & c \text{ ist Minimalschnitt} \\ -1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.5)$$

Festzuhalten ist, dass das Ergebnis eine Funktion von Nichtverfügbarkeiten $q(c)$ von Schnitten (nicht notwendig Minimalschnitten) ist.

Ein Ansatz, um ohne explizierte Modellierung der übergreifenden GVA diese berücksichtigen zu können, beruht darauf, statt $q(c)$ einen modifizierten Wert $q^{Mod}(c)$ zu verwenden, der die ggf. erhöhte Unverfügbarkeit aufgrund übergreifender GVA berücksichtigt.

Ist z. B. der Minimalschnitt c die Menge der Basisereignisse der GVA von Komponenten k_1 und k_2 sowie von Komponenten k_3 und k_4 , d. h.

$$c = \{GVA(k_1, k_2), GVA(k_3, k_4)\} \quad (3.6)$$

so gilt:

$$q(c) = q(GVA(k_1, k_2)) q(GVA(k_3, k_4)) \quad (3.7)$$

Der zur Berücksichtigung von übergreifenden GVA zu verwendende modifizierte Wert ist

$$q^{Mod}(c) = q(GVA(k_1, k_2)) q(GVA(k_3, k_4) | GVA(k_1, k_2)) \quad (3.8)$$

wobei $q(GVA(k_3, k_4) | GVA(k_1, k_2))$ die Wahrscheinlichkeit der Nichtverfügbarkeit von $\{k_3, k_4\}$, gegeben $\{k_1, k_2\}$ sind nicht verfügbar, bezeichnet. Bei Modellierung übergreifender GVA ist die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein GVA von Komponenten k_3 und k_4 auftritt, wenn k_1 und k_2 bereits von einem GVA betroffen sind, größer als die unbedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein GVA von Komponenten k_3 und k_4 auftritt:

$$q(GVA(k_3, k_4) | GVA(k_1, k_2)) > q(GVA(k_3, k_4)) \quad (3.9)$$

Dabei muss $q(GVA(k_3, k_4)|GVA(k_1, k_2))$ aus der Betriebserfahrung bestimmt werden.

Aus Gleichung 3.9 folgt:

$$q^{mod}(c) > q(c) \tag{3.10}$$

Der Anwendung dieses Ansatzes steht in der Praxis ein Hindernis entgegen: Die Gesamtzahl der Minimalschnitt einer vollständigen PSA der Stufe 1 ist viel zu groß, als dass man sie bestimmen oder speichern könnte. Daher müssen die heuristischen Suchalgorithmen für Minimalschnitte sogenannte "Cut-off-Verfahren" nutzen, um die führenden Minimalschnitte zu bestimmen (siehe /SCA 12/). Für die Anwendung des oben dargestellten Ansatzes impliziert dies, dass sichergestellt werden muss, dass die für übergreifende GVA relevanten Minimalschnitte nicht bei der Anwendung des Cut-off-Verfahrens verworfen werden.

3.2.1 Beispielhafte Anwendung des ersten Ansatzes

Zunächst wird ein einfaches Beispiel (Beispiel A) diskutiert, bei dem man die Rechnungen unmittelbar nachverfolgen kann. Betrachtet werden drei Notstromdiesel: eine Gruppe von zwei identischen Notstromdieseln und ein weiterer teildiversitärer Diesel. Das TOP-Ereignis ist die Nichtverfügbarkeit aller drei Diesel. In Abbildung 3.1 werden die modellierten Komponenten und die zu berücksichtigenden verallgemeinerten Komponentengruppen dargestellt.

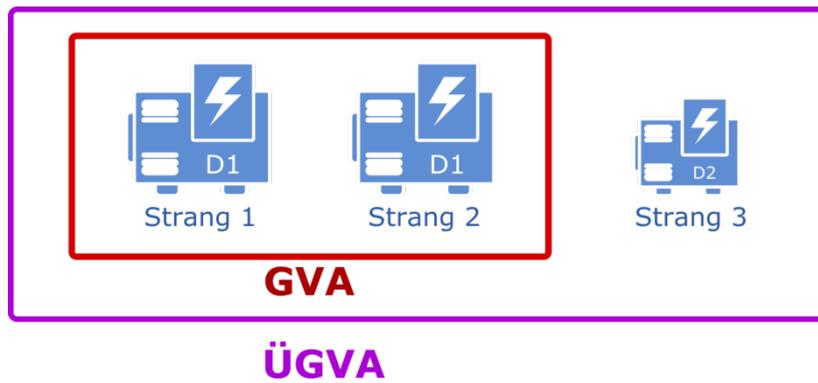


Abb. 3.1 Betrachtete Komponenten und verallgemeinerte Komponentengruppen von Beispiel A

Folgende Basisereignisse sind zur Modellierung von Einzelausfällen und GVA (ohne ÜGVA) zu berücksichtigen:

- Einzelausfall Diesel 1 (Basisereignis „EAD1“)
- Einzelausfall Diesel 2 (Basisereignis „EAD2“)
- Einzelausfall Diesel 3 (Basisereignis „EAD3“)
- GVA Diesel 1 und 2 (Basisereignis „GVAD12“)

In Abbildung 3.2 ist der Fehlerbaum des TOP-Ereignisses „Ausfall aller drei Diesel“ (ohne Berücksichtigung der ÜGVA) dargestellt.

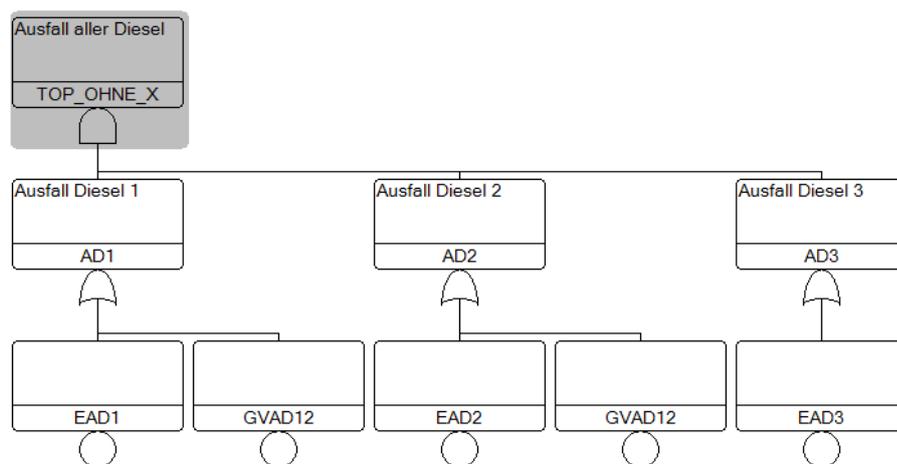


Abb. 3.2 Fehlerbaum des TOP-Ereignisses „Ausfall aller drei Diesel“ ohne ÜGVA

Die Menge aller Minimalschnitte ist, wie man leicht nachvollziehen kann:

1. Einzelausfälle aller drei Diesel: {EAD1, EAD2, EAD3}
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3: {GVAD12, EAD3}

Folgende übergreifende GVA können auftreten:

- ÜGVA Diesel 1 und 2 („ÜGVAD12“)
- ÜGVA Diesel 1 und 3 („ÜGVAD13“)
- ÜGVA Diesel 2 und 3 („ÜGVAD23“)
- ÜGVA aller Diesel 1, 2 und 3 („ÜGVAD123“)

In Kapitel 2 wurde so vorgegangen, diese ÜGVA im Fehlerbaum als Basisereignisse explizit zu berücksichtigen. Der Fehlerbaum, den man dann erhält, ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

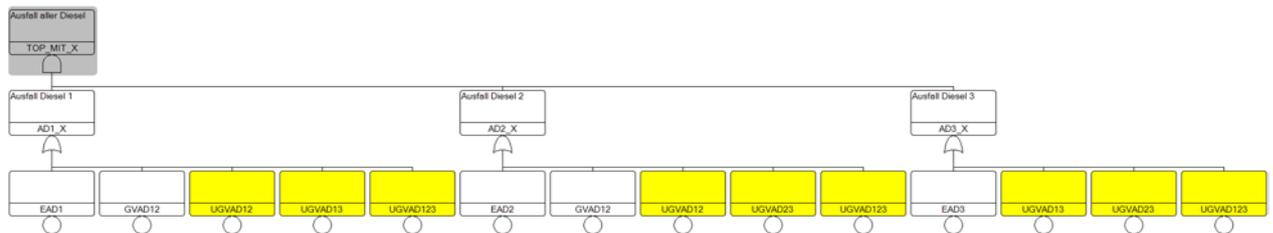


Abb. 3.3 Fehlerbaum des TOP-Ereignisses „Ausfall aller drei Diesel“ mit Berücksichtigung übergreifender GVA. Basisereignisse für übergreifende GVA sind gelb hervorgehoben.

Die Menge aller Minimalschnitte ist dann:

1. Einzelausfälle aller drei Diesel: {EAD1, EAD2, EAD3} (wie zuvor)
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3: {GVAD12, EAD3} (wie zuvor)
3. ÜGVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3: {ÜGVAD12, EAD3}
4. ÜGVA Diesel 1 und 3 und Einzelausfall Diesel 2: {ÜGVAD13, EAD2}
5. ÜGVA Diesel 2 und 3 und Einzelausfall Diesel 1: {ÜGVAD23, EAD1}
6. ÜGVA Diesel 1, 2 und 3: {ÜGVAD123}

Nun soll versucht werden, die bedingten Wahrscheinlichkeiten so zu ermitteln, dass sich aus der Quantifizierung dasselbe Ergebnis ergibt. Hierbei stellt sich das Problem, dass die Quantifizierung in Kapitel 2 zielend auf die explizite Fehlerbaummodellierung von übergreifenden GVA als Basisereignisse im Fehlerbaum in Form von Nichtverfügbarkeiten durch übergreifende GVA bestimmt wurde und nicht versucht wurde, die hier gesuchte bedingte Wahrscheinlichkeit von Basisereignissen aus der Betriebserfahrung zu schätzen.

Folgende Parameter gehen in die Quantifizierung bei expliziter Modellierung der ÜGVA ein:

1. Wahrscheinlichkeiten des Einzelausfalls (identisch für alle drei Diesel): Q_{EA}
2. GVA Diesel 1 und 2: $Q_{2\setminus 2}^{nX}$
3. ÜGVA Diesel 1 und 2, ÜGVA Diesel 1 und 3, ÜGVA Diesel 2 und 3: $Q_{2\setminus 3}^X$
4. ÜGVA Diesel 1, 2 und 3: $Q_{3\setminus 3}^X$

Somit ergibt sich die Quantifizierung der Minimalschnitte zu:

1. Einzelausfälle aller drei Diesel (Minimalschnitt {EAD1, EAD2, EAD3}): $(Q_{EA})^3$
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3 (Minimalschnitt {GVAD12, EAD3}): $Q_{2\setminus 2}^{nX} Q_{EA}$
3. ÜGVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3 (Minimalschnitt {ÜGVAD12, EAD3}): $Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA}$
4. ÜGVA Diesel 1 und 3 und Einzelausfall Diesel 2 (Minimalschnitt {ÜGVAD13, EAD2}): $Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA}$
5. ÜGVA Diesel 2 und 3 und Einzelausfall Diesel 1 (Minimalschnitt {ÜGVAD23, EAD1}): $Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA}$
6. ÜGVA Diesel 1, 2 und 3 (Minimalschnitt {ÜGVAD123}): $Q_{3\setminus 3}^X$

Insgesamt erhält man für das TOP-Ereignis somit² bei Berücksichtigung der übergreifenden GVA (durch den oberen Index X verdeutlicht):

$$q^X(TOP) = (Q_{EA})^3 + Q_{2\setminus 2}^{nX} Q_{EA} + 3 Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA} + Q_{3\setminus 3}^X \quad (3.11)$$

Ohne Berücksichtigung der übergreifenden GVA ist die Menge aller Minimalschnitte:

1. Einzelausfälle aller drei Diesel (Minimalschnitt {EAD1, EAD2, EAD3}): $(Q_{EA})^3$
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3 (Minimalschnitt {GVAD12, EAD3}):
 $Q_{2\setminus 2} Q_{EA}$

Insgesamt erhält man für das TOP-Ereignis somit³:

$$q(TOP) = (Q_{EA})^3 + Q_{2\setminus 2} Q_{EA} \quad (3.12)$$

Um die ÜGVA zu berücksichtigen, ist nun die Quantifizierung der Minimalschnitte dahingehend zu ändern, dass sich ein — zumindest in erster Ordnung — identisches Ergebnis ergibt.

Es ist offensichtlich, dass sich aus den obigen Gleichungen keine eindeutige Lösung ableiten lässt.

Wenn man in Minimalschnitten, in denen bereits ein Einzelausfall des dritten Diesels eingetreten ist (Basisereignis EAD3), die Nichtverfügbarkeit des Basisereignisses GVAD12 modifiziert gemäß

$$q(GVA12|EAD3) = Q_{2\setminus 2}^{nX} + 3Q_{2\setminus 3}^X + \frac{Q_{3\setminus 3}^X}{Q_{EA}} \quad (3.13)$$

und

² in Seltene-Ereignisse-Näherung

³ in Seltene-Ereignisse-Näherung

$$q(EAD2|EAD3) = q(EAD1|EAD2 \cap EAD3) := Q_{EA} \quad (3.14)$$

d. h. die Einzelausfallwahrscheinlichkeiten bleibt unverändert, so ergibt sich das gewünschte Ergebnis:

$$q^{mod}(TOP) = Q_{EA} Q_{2\setminus 2}^{nX} + 3Q_{EA} Q_{2\setminus 3}^X + Q_{3\setminus 3}^X + (Q_{EA})^3 = q^X(TOP) \quad (3.15)$$

Ebenso lässt sich mit

$$q(GVA12|EAD3) := Q_{2\setminus 2}^{nX} + Q_{2\setminus 3}^X + \frac{Q_{3\setminus 3}^X}{Q_{EA}} \quad (3.16)$$

sowie

$$q(EAD2|EAD3) := 2 \frac{Q_{2\setminus 3}^X}{Q_{EA}} + Q_{EA} \quad (3.17)$$

und

$$q(EAD1|EAD2 \cap EAD3) := Q_{EA} \quad (3.18)$$

das erwünschte Ergebnis

$$\begin{aligned} q^{mod}(TOP) &= Q_{EA} Q_{2\setminus 2}^{nX} + Q_{EA} Q_{2\setminus 3}^X + Q_{3\setminus 3}^X + Q_{EA} 2 Q_{2\setminus 3}^X + (Q_{EA})^3 \\ &= q^X(TOP) \end{aligned} \quad (3.19)$$

erzielen. Diese Wahl hat allerdings den Nachteil, dass hier die Symmetrie zwischen EAD2 und EAD3 verloren geht.

Dies beleuchtet die Tatsache, dass die Forderung nach dem zutreffenden Gesamtergebnis dazu führt, dass

- die bedingten Nichtverfügbarkeiten nicht eindeutig bestimmbar sind und
- die Nichtverfügbarkeiten der Minimalschnitte keine eindeutigen, klar interpretierbaren Bedeutungen haben.

Anhand dieser Überlegungen erscheint der beschriebene Ansatz nicht zielführend. Deshalb wurde ein alternativer Ansatz entwickelt, der nicht in der Modifikation der Quantifizierung von Minimalschnitten, sondern in der Ergänzung der Minimalschnittmenge besteht.

3.3 Weiterentwickelter Ansatz: Ergänzung der Minimalschnittmenge

Grundidee dieses Ansatzes ist die *Ergänzung* der Minimalschnittmenge, um übergreifende GVA zu berücksichtigen. Hierzu wird zunächst der Begriff des X-Minimalschnittes eingeführt:

Ein X-Minimalschnitt ist ein Minimalschnitt des Fehlerbaums bei modelliertem übergreifenden GVA, der kein Minimalschnitt des Fehlerbaums bei nicht modelliertem übergreifenden GVA ist.

X-Minimalschnitte sind also diejenigen Minimalschnitte des Fehlerbaums bei modelliertem übergreifenden GVA, die mindestens ein Basisereignis enthalten, das einem übergreifenden GVA entspricht.

Aufgabe ist es nun, die Minimalschnittmenge des Fehlerbaums ohne modellierte übergreifende GVA so um X-Minimalschnitte zu ergänzen, dass die übergreifenden GVA korrekt berücksichtigt werden.

Zur Ausarbeitung dieses Ansatzes wird zunächst davon ausgegangen, dass es eine verallgemeinerte Komponentengruppe für ÜGVA gibt, die alle Komponenten beinhaltet, die Elemente verallgemeinerter Komponentengruppen sind, deren GVA in dem Fehlerbaum modelliert sind sowie ggf. weiterer einzelner Komponenten. Beispiel B in Abbildung 3.4 zeigt eine exemplarische Gruppierung auf die diese Annahme zutrifft. Zwei verallgemeinerte Komponentengruppen, die einen GVA von 2 bzw. 3 Dieseln umfassen, und eine verallgemeinerte Komponentengruppen, durch die ein ÜGVA aller Diesel

einschließlich eines einzelnen Diesels, der in keiner GVA-Komponentengruppe enthalten ist, modelliert wird.

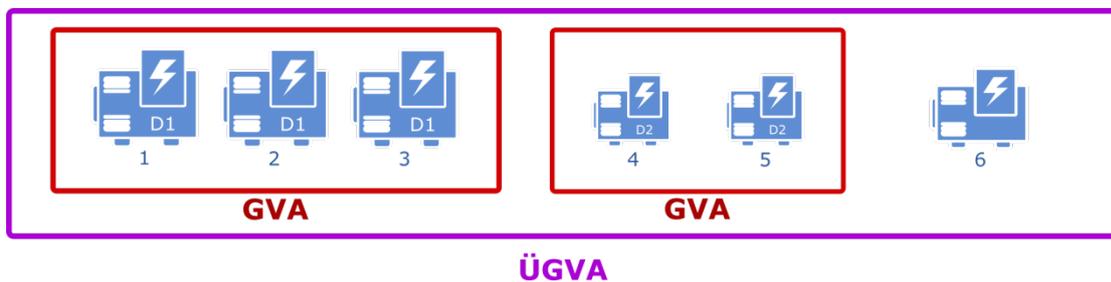


Abb. 3.4 Verallgemeinerte Komponentengruppen für GVA und ÜGVA für Beispiel B

Es wird wie folgt vorgegangen:

Zuerst werden diejenigen Minimalschnitte identifiziert, die mehrere Komponenten beinhalten, die innerhalb der verallgemeinerten Komponentengruppe für ÜGVA, aber nicht innerhalb einer verallgemeinerten Komponentengruppe für GVA liegen. Beim oben gezeigten Beispiel wären dies z. B. Minimalschnitte wie

- {GVAD123, GVAD45}
- {EAD1, GVAD45}
- {EAD1, EAD5}
- {EAD1, EAD6}

nicht jedoch Minimalschnitte wie

- {GVAD12, EAD3}
- {EAD1, EAD2}

Algorithmisch kann dies einfach so implementiert werden, dass die Menge aller Komponenten gebildet wird, die von den im Minimalschnitt enthaltenen Ausfällen betroffen sind. Z. B. im Falle des Minimalschnitts {EAD1, GVAD45} sind dies die Komponenten 1, 4 und 5 und im Falle des Minimalschnitts {EAD1, EAD2} die Komponenten 1 und 2. Gibt es eine verallgemeinerte Komponentengruppe für GVA, in der alle diese Komponenten liegen, so sind die Minimalschnitte für ÜGVA irrelevant, andernfalls relevant.

Auf diese Weise werden die Minimalschnitte identifiziert, für die ÜGVA zu ergänzen sind. Im Folgenden wird diskutiert, *wie* die ÜGVA mithilfe zusätzlicher Minimalschnitte ergänzt werden können.

Es ist offensichtlich, dass Minimalschnitte mit denjenigen ÜGVA ergänzt werden sollen, die genau die oben genannten Komponenten betreffen. Z. B. wird für den Minimalschnitt {GVAD12, GVAD45}, der die Komponenten 1, 2, 4 und 5 betrifft, der X-Minimalschnitt {ÜGVAD1245} ergänzt. Es ist aber zu berücksichtigen, dass ein Ausfall der Komponenten 1, 2, 4 und 5 auch durch einen ÜGVA der Komponenten 1 und 4 und einen zufällig gleichzeitigen ÜGVA der Komponenten 2 und 5 (X-Minimalschnitt {ÜGVAD14, ÜGVAD35}) sowie durch einen ÜGVA der Komponenten 1 und 5 und einen zufällig gleichzeitigen ÜGVA der Komponenten 2 und 4 (X-Minimalschnitt {ÜGVAD15, ÜGVAD34}) erfolgen kann. Bei einer großen Anzahl der betroffenen Komponenten wächst die Anzahl der kombinatorischen Möglichkeiten sehr stark an.

Es bestehen theoretisch die Möglichkeiten, entweder alle Minimalschnitte zu ergänzen oder nur einen repräsentativen. Vor- und Nachteile der beiden Ansätze werden im Folgenden diskutiert.

3.3.1 Ergänzung aller X-Minimalschnitte

Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass dann eine vollständige Liste der Minimalschnitte zur Verfügung steht, die für Analysen wie z. B. Importanzanalysen grundsätzlich verwendbar ist. Auch ist die Quantifizierung der Minimalschnitte einfach, da sich die Wahrscheinlichkeit eines X-Minimalschnittes als Produkt der Wahrscheinlichkeiten der auftretenden Basisereignisse und X-Basisereignisse ergibt. Die Wahrscheinlichkeit der X-Basisereignisse ergibt sich aus der Betriebserfahrung. Allerdings kann die Anzahl aller X-Minimalschnitte extrem groß werden, wie man einfach daran erkennt, dass schon die Anzahl der X-Basisereignisse mit der Größe der verallgemeinerten Komponentengruppe stark ansteigt. X-Minimalschnitte enthalten einen oder mehrere X-Basisereignisse und ggf. ein oder mehrere Basisereignisse. Wie groß die Anzahl der verschiedenen X-Minimalschnitte ist, hängt vom modellierten System und betrachteten TOP-Ereignis ab.

Im einfachen Beispiel aus Kapitel 3.2.12.1 mit 3 Dieseln gibt es bereits 4 X-Minimalschnitte (gegenüber 2 Minimalschnitten). Für ein Beispiel mit 4 Dieseln, die sich zwei Gruppen zu je 2 identischen Dieseln und einer verallgemeinerten Komponenten-

gruppe aller 4 teildiversitären Diesel zuordnen lassen (vgl. Beispiel C in Abb. 3.5), ergeben sich folgende 4 Minimalschnitte für das TOP-Ereignis „Ausfall aller Diesel“:

1. Einzelausfälle aller vier Diesel: {EAD1, EAD2, EAD3, EAD4}
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3 und 4: {GVAD12, EAD3, EAD4}
3. GVA Diesel 3 und 4 und Einzelausfall Diesel 1 und 2: {GVAD34, EAD1, EAD2}
4. GVA Diesel 1 und 2 und GVA Diesel 3 und 4: {GVAD12, GVAD34}

Folgende übergreifende GVA können auftreten:

- ÜGVA aller Diesel (ÜGVAD1234)
- 4 verschiedene ÜGVA dreier Diesel (ÜGVAD123, ÜGVAD124 usw.)
- 6 verschiedene ÜGVA zweier Diesel (ÜGVAD12, ÜGVAD13 usw.)

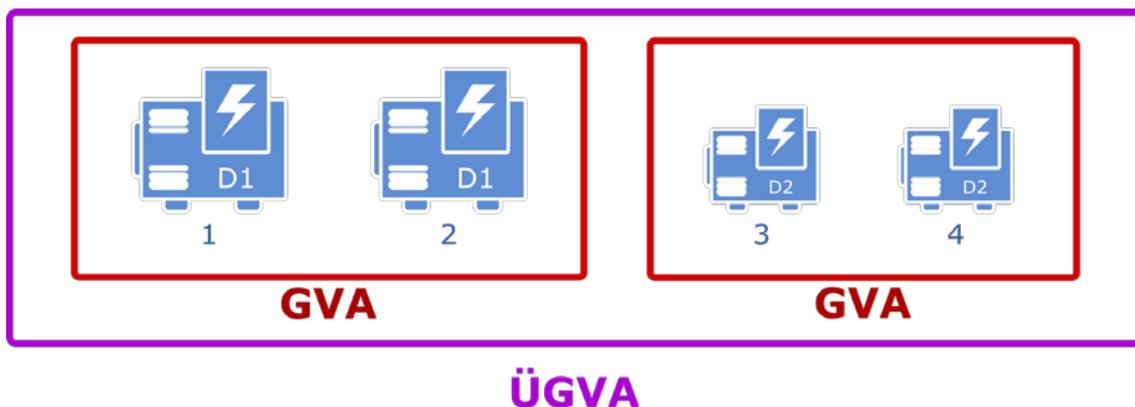


Abb. 3.5 Verallgemeinerte Komponentengruppen für GVA und ÜGVA für Beispiel C mit zwei Gruppen zu je 2 identischen Dieseln und einer verallgemeinerten Komponentengruppe aller 4 teildiversitären Diesel

Somit gibt es insgesamt 11 verschiedene ÜGVA. Daraus ergeben sich 72 X-Minimalschnitte, wie die Minimalschnittanalyse des zugehörigen Fehlerbaums (siehe Abb. 3.6) ergab. Für größere Anzahlen der Komponenten steigt die Anzahl der X-Minimalschnitte weiter an, so dass eine Ergänzung aller X-Minimalschnitte nicht sinnvoll erscheint. Deshalb soll im Folgenden ein Verfahren entwickelt werden, wie ein einzelner repräsentativer X-Minimalschnitt ergänzt und quantifiziert werden kann.

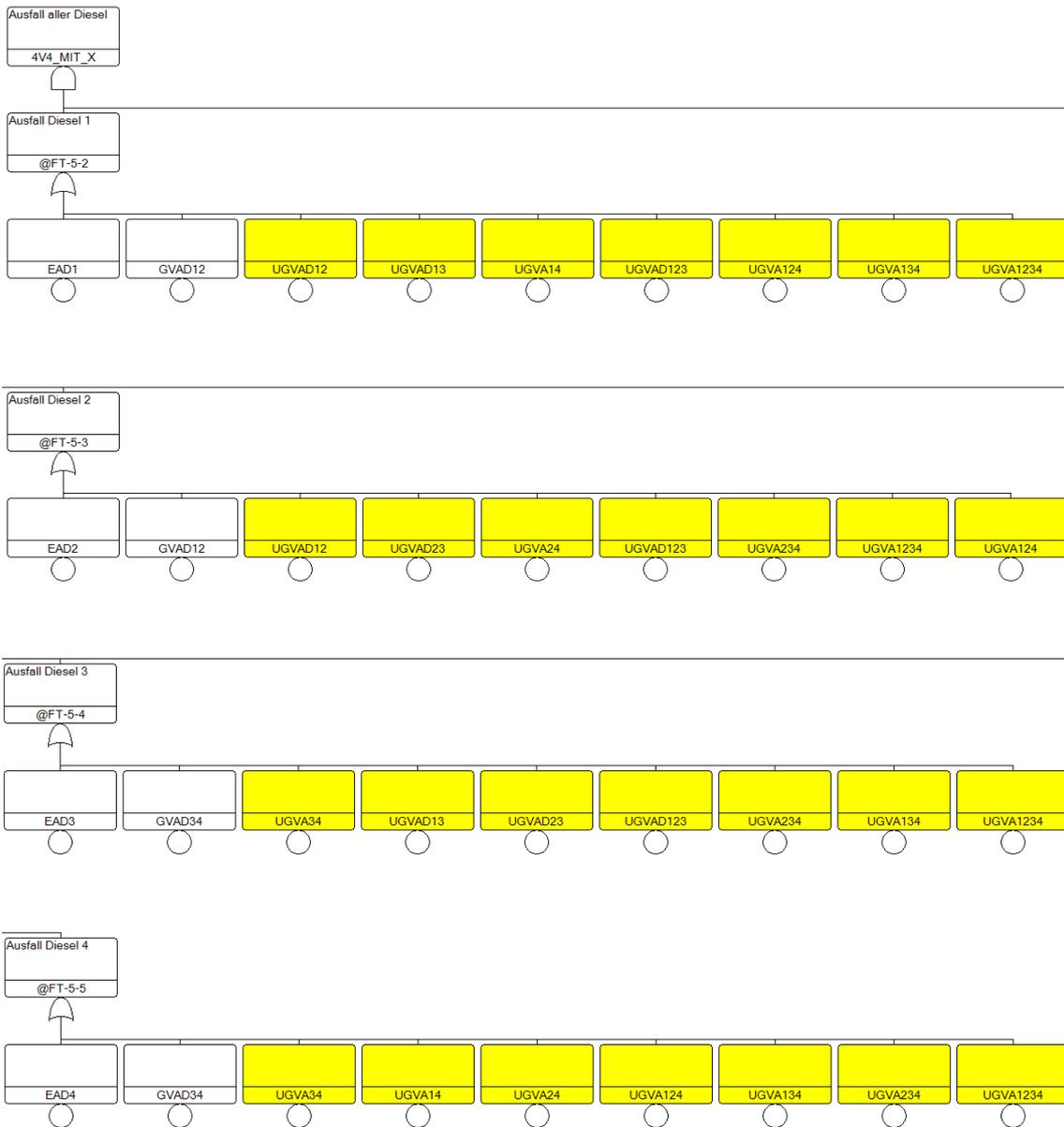


Abb. 3.6 Fehlerbaum des Systems aus Abbildung 3.5 bei Modellierung übergreifender GVA

3.3.2 Ergänzung ausgewählter repräsentativer X-Minimalschnitte

Nun wird der Ansatz verfolgt, nur ausgewählte X-Minimalschnitte zu ergänzen, die jeweils mehrere X-Minimalschnitte repräsentieren und entsprechend quantifiziert werden. Hierbei werden alle X-Minimalschnitte, bei denen dieselben Komponenten einer verallgemeinerten Komponentengruppe ausgefallen sind, durch einen repräsentativen X-Minimalschnitt (im folgenden RX-Minimalschnitt genannt) dargestellt. Um das Vorgehen zu erläutern, wird zunächst wieder das einfache Beispiel A aus Abbildung 3.1 be-

trachtet. Für die Analyse ist es wesentlich von den Minimalschnitten des PSA-Modells ohne übergreifende GVA auszugehen.

Die Menge aller Minimalschnitte ist:

1. Einzelausfälle aller drei Diesel: {EAD1, EAD2, EAD3}
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3: {GVAD12, EAD3}

Das heißt, bei beiden Minimalschnitten sind jeweils alle drei Diesel ausgefallen. Alle drei Diesel sind Mitglieder der verallgemeinerten GVA-Gruppe, die die übergreifenden GVA repräsentiert.

Der übergreifende GVA aller Diesel wird nun repräsentiert durch den RX-Minimalschnitt

3. ÜGVA Diesel 1, 2 und 3: {ÜGVAD123}

Um zu ermitteln, wie dieser zu quantifizieren ist, können alle X-Minimalschnitte betrachtet werden, die er repräsentiert. Es sind dies:

1. ÜGVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3: {ÜGVAD12, EAD3}: Wahrscheinlichkeit $Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA}$
2. ÜGVA Diesel 1 und 3 und Einzelausfall Diesel 2: {ÜGVAD13, EAD2}: Wahrscheinlichkeit $Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA}$
3. ÜGVA Diesel 2 und 3 und Einzelausfall Diesel 1: {ÜGVAD23, EAD1}: Wahrscheinlichkeit $Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA}$
4. ÜGVA Diesel 1, 2 und 3: {ÜGVAD123}: Wahrscheinlichkeit $Q_{3\setminus 3}^X$
5. GVA Diesel 1 und 2 und ÜGVA Diesel 1 und 3 bzw. 2 und 3 {GVAD12, ÜGVAD13}, {GVAD12, ÜGVAD23}: Wahrscheinlichkeit je $Q_{2\setminus 2}^{nX} Q_{2\setminus 3}^X$
6. Kombination zweier ÜGVA: {ÜGVAD12, ÜGVAD13}, {ÜGVAD12, ÜGVAD23}, {ÜGVAD13, ÜGVAD23}: Wahrscheinlichkeit je $(Q_{2\setminus 3}^X)^2$

Somit ist die Nichtverfügbarkeit des RX-Minimalschnittes {ÜGVAD123}⁴:

$$\begin{aligned}
 q^{RX}(\text{ÜGVAD123}) &= 3Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA} + Q_{3\setminus 3}^X + 2Q_{2\setminus 2}^{nX} Q_{2\setminus 3}^X + (Q_{2\setminus 3}^X)^2 \\
 &= q_{2\setminus 3}^X Q_{EA} + q_{3\setminus 3}^X + 2Q_{2\setminus 2}^{nX} Q_{2\setminus 3}^X + (Q_{2\setminus 3}^X)^2
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

Unter der Annahme, dass GVA bzw. ÜGVA-Wahrscheinlichkeiten klein sind, sind die letzten beiden Summanden vernachlässigbar. D.h. der RX-Minimalschnitt {ÜGVAD123} ergibt sich als Wahrscheinlichkeit, dass ein übergreifender GVA aller Diesel auftritt oder dass ein übergreifender GVA zweier Diesel auftritt und die verbleibende Komponente durch Einzelfehler ausfällt.

Somit ist nun die um RX-Minimalschnitte ergänzte und quantifizierte Minimalschnittliste:

1. Einzelausfälle aller drei Diesel: {EAD1, EAD2, EAD3}: Wahrscheinlichkeit $(Q_{EA})^3$
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3: {GVAD12, EAD3}: Wahrscheinlichkeit $Q_{2\setminus 2}^{nX} Q_{EA}$
3. ÜGVA Diesel 1, 2 und 3: {ÜGVAD123}: Wahrscheinlichkeit $q_{2\setminus 3}^X Q_{EA} + q_{3\setminus 3}^X$

3.4 Allgemeine Vorgehensweise

Hier wird der Fall betrachtet, dass, wie in Abbildung 3.5 skizziert, eine verallgemeinerte Komponentengruppe existiert, die übergreifende GVA beschreibt, die eine oder mehrere verallgemeinerte Komponentengruppen für nicht übergreifende GVA und ggf. einzelne Komponenten beinhalten.

Dann stellt sich die prinzipielle Vorgehensweise, wie aus der Minimalschnittliste die Liste der zu ergänzenden RX-Minimalschnitte (RX-Minimalschnittliste) bestimmt wird, algorithmisch so dar:

1. Führe für alle Minimalschnitte der Minimalschnittliste des TOP aus:

⁴ In diesem Bericht werden Nichtverfügbarkeiten durch GVA, die sich auf eine bestimmte Menge ausgefallene Komponenten beziehen, durch ein groß geschriebenes Q , während sich Nichtverfügbarkeiten durch GVA, die sich nur auf eine bestimmte Anzahl beziehen, durch ein klein geschriebenes q bezeichnet werden. Diese Größen stehen in folgender Beziehung: $q_{k\setminus r} = \binom{r}{k} Q_{k\setminus r}$

- a) Ermittle, welche Komponentenausfälle innerhalb der ÜGVA-Gruppe den Basisereignissen des Minimalschnitts entsprechen.
- b) Ist diese Anzahl der Komponentenausfälle kleiner 2 oder sind alle betroffenen Komponenten in *einer* GVA-Gruppe enthalten, so fahre mit dem nächsten Minimalschnitt fort.
- c) andernfalls
 - i. ersetze in einer Kopie des Minimalschnitts alle Basisereignisse, die Ausfällen von Komponenten der ÜGVA-Gruppe entsprechen (GVA und Einzelausfälle), durch das entsprechende X-Basisereignis, z. B. {... GVAD12, EAD4, ...} durch {... ÜGVAD124, ...} oder {... EAD1, EAD4, EAD5, ...} durch {... ÜGVAD145, ...}
 - ii. falls der resultierende RX-Minimalschnitt noch nicht in der RX-Minimalschnittliste enthalten ist:
 1. nehme den RX-Minimalschnitt in die RX-Minimalschnittliste auf.
 - iii. Fahre mit dem nächsten Minimalschnitt fort

Die erweiterte Minimalschnittliste zur quantitativen Berücksichtigung von ÜGVA ergibt sich aus der Vereinigung der ursprünglichen Minimalschnittliste mit der RX-Minimalschnittliste.

Für die Quantifizierung der Minimalschnitte ist folgendes zu berücksichtigen:

- Als Nichtverfügbarkeiten für GVA-Basisereignisse (nicht übergreifende GVA) sind die Werte zu verwenden, die für nicht übergreifende GVA bei Berücksichtigung übergreifender GVA geschätzt wurden, d. h. $Q_{k \setminus r}^{nX}$.
- Bei der exakten Quantifizierung der X-Basisereignisse in RX-Minimalschnitten sind alle X-Basisereignisse und Kombinationen von X-Basisereignissen und Basisereignissen zu berücksichtigen, die von ihnen repräsentiert werden.

Auf den letzten Punkt wird in Abschnitt 3.5 näher eingegangen. Zuvor werden jedoch noch weitere Beispiele zunehmender Komplexität diskutiert, um die damit einhergehende Problematik näher zu erläutern.

3.4.1 Beispiel C

Hier wird das Beispiel C aus Abbildung 3.5 betrachtet. Es gibt wie oben erwähnt 4 Minimalschnitte für das TOP-Ereignis „Ausfall aller Diesel“:

1. Einzelausfälle aller vier Diesel: {EAD1, EAD2, EAD3, EAD4}
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3 und 4: {GVAD12, EAD3, EAD4}
3. GVA Diesel 3 und 4 und Einzelausfall Diesel 1 und 2: {GVAD34, EAD1, EAD2}
4. GVA Diesel 1 und 2 und GVA Diesel 3 und 4: {GVAD12, GVAD34}

Alle diese 4 werden repräsentiert durch den RX-Minimalschnitt

5. ÜGVA Diesel 1, 2, 3 und 4: {ÜGVAD1234}

Die Quantifizierung ergibt sich aus allen kombinatorischen Möglichkeiten, die ÜGVA beinhalten. Es sind dies:

1. ÜGVA Diesel 1, 2, 3 und 4: $Q_{4\setminus 4}^X$
2. ÜGVA Diesel 1, 2, 3 und Einzelausfall Diesel 4 sowie 3 entsprechende weitere:
 $4 Q_{3\setminus 4}^X Q_{EA} = q_{3\setminus 4}^X Q_{EA}$
3. ÜGVA Diesel 1, 2, 3 und ein GVA, der Diesel 3 und 4 betrifft sowie 3 entsprechende weitere: $4 Q_{3\setminus 4}^X Q_{2\setminus 2}^{nX} = q_{3\setminus 4}^X Q_{2\setminus 2}^{nX}$
4. ÜGVA Diesel 1, 2 und ein GVA, der Diesel 3 und 4 betrifft sowie ÜGVA Diesel 3, 4 und ein GVA, der Diesel 1 und 2 betrifft : $2 Q_{2\setminus 4}^X Q_{2\setminus 2}^{nX}$
5. ÜGVA zweier Diesel und zwei Einzelausfälle: $q_{2\setminus 4}^X (Q_{EA})^2$
6. Kombinationen von zwei ÜGVA⁵: $q_{2\setminus 4}^X (Q_{2\setminus 4}^X + 2Q_{3\setminus 4}^X) + 3q_{3\setminus 4}^X Q_{3\setminus 4}^X$
7. Kombinationen von zwei ÜGVA (zwei 2 von 4-Ausfälle) mit einem Einzelausfall⁶
 $q_{2\setminus 4}^X 2Q_{2\setminus 4}^X Q_{EA}$

⁵ Zu betrachten sind alle Kombinationen aus ÜGVA, die zwei bzw. drei Komponenten betreffen.

⁶ Hier sind nur 2 von 4-ÜGVA zu betrachten, da Kombinationen eines 3 von 4-ÜGVA mit einem 2 von 4-ÜGVA und einem Einzelausfall nicht minimal sind.

8. Kombination von einem ÜGVA zweier Diesel, einem GVA und einem Einzelfehler:

$$8 Q_{2\setminus 4}^X Q_{2\setminus 2}^{nX} Q_{EA}$$

Da allgemein GVA-Ereignisse viel unwahrscheinlicher als Einzelausfälle und ÜGVA wiederum wesentlich unwahrscheinlicher als GVA sind, sind die Terme 6 bis 8 von untergeordnetem Interesse. Die Vernachlässigung dieser Terme wäre konsistent zu den üblichen Verfahren zur Quantifizierung von GVA aus der Betriebserfahrung, bei der die Möglichkeit des zufälligen Auftretens zweier GVA aus gleicher Ursache in den mathematischen Schätzalgorithmen nicht berücksichtigt wird.

Ebenfalls ist erkennbar, dass für größere Systeme die Anzahl der kombinatorischen Möglichkeiten sehr groß wird. In Kapitel 3.5 wird darauf näher eingegangen.

3.4.2 Beispiel D

Das im Folgenden beschriebene Beispiel D basiert auf Beispiel A in Abb. 3.1. Der Unterschied zu Beispiel A ist, dass je Strang noch eine weitere Komponente einbezogen wird, z. B. eine Pumpe, für die jeweils Einzelfehler sowie GVA der Pumpen Strang 1 und 2 berücksichtigt werden, aber keine ÜGVA für Pumpen (vgl. Abbildung 3.7). Das TOP-Ereignis ist das Versagen der Einspeisung aller Stränge. Die Einspeisung eines Stranges kann durch Versagen der Stromversorgung oder Versagen der Pumpe versagen. Aus dieser Struktur ergibt sich die Eigenschaft, dass mehrere RX-Minimalschnitte ergänzt werden müssen.

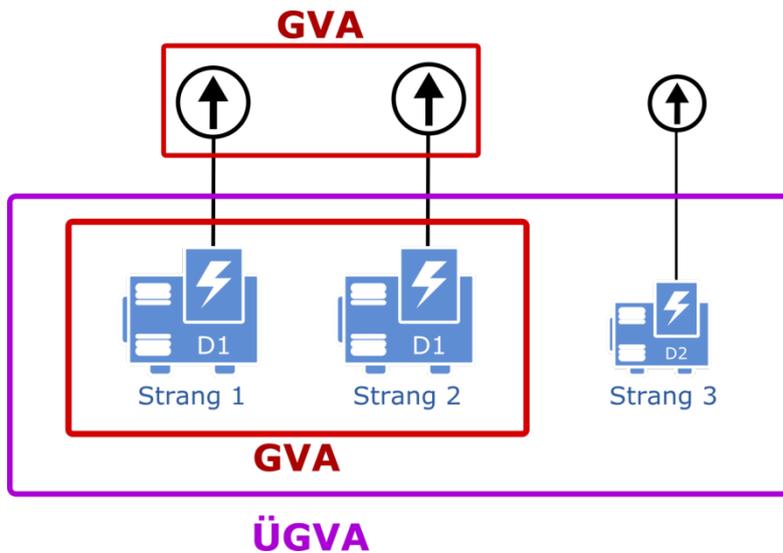


Abb. 3.7 Verallgemeinerte Komponentengruppen für GVA und ÜGVA für Beispiel D

Es gibt für das TOP-Ereignis „Ausfall der gesamten Einspeisung“ folgende Minimal-schnitte:

1. Einzelausfälle aller drei Diesel: {EAD1, EAD2, EAD3} (wie in Kap.3.2.1)
2. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3: {GVAD12, EAD3} (wie in Kap.3.2.1)
3. Einzelausfälle aller drei Pumpen: {EAP1, EAP2, EAP3}
4. GVA Diesel 1 und 2 und Einzelausfall Pumpe 3: {GVAD12, EAP3}
5. Kombinationen von Einzelausfällen zweier Diesel und einer Pumpe: {EAP1, EAD2, EAD3}, {EAD1, EAP2, EAD3}, {EAD1, EAD2, EAP3}
6. Kombinationen von Einzelausfällen zweier Pumpen und eines Diesels: {EAD1, EAP2, EAP3}, {EADP1, EAD2, EAP3}, {EAP1, EAP2, EAD3}
7. GVA Pumpen 1 und 2 und Einzelausfall Diesel 3: {GVAP12, EAD3}
8. GVA Pumpen 1 und 2 und Einzelausfall Pumpe 3: {GVAP12, EAP3}

Für die übergreifenden GVA sind die Minimalschnitte der Nummern 1, 2, 4 und 5 relevant. Daraus ergeben sich folgende RX-Minimalschnitte:

9. ÜGVA Diesel 1, 2 und 3: {ÜGVAD123} (wie in Abschnitt 3.2.1)
10. ÜGVA Diesel 1, 2 und Einzelausfall Pumpe 3: {ÜGVAD12, EFP3}

11. ÜGVA Diesel 1, 3 und Einzelausfall Pumpe 2: {ÜGVAD13, EFP2}

12. ÜGVA Diesel 2, 3 und Einzelausfall Pumpe 1: {ÜGVAD23, EFP1}

In Bezug auf die Quantifizierung ergibt sich für 9. der bereits in Abschnitt 3.3.2 hergeleitete Wert:

- ÜGVA Diesel 1, 2 und 3: {ÜGVAD123}: Wahrscheinlichkeit $3Q_{2\setminus 3}^X Q_{EA} + Q_{3\setminus 3}^X + 2Q_{2\setminus 2}^X Q_{2\setminus 3}^X + (Q_{2\setminus 3}^X)^2$

Für die anderen RX-Minimalschnitte 10 – 12 ergibt sich jeweils:

- ÜGVA Diesel 1, 2 und Einzelausfall Pumpe 3 usw. {ÜGVAD12, EFP3}, {ÜGVAD13, EFP2}, {ÜGVAD23, EFP1}: je $Q_{2\setminus 3}^X \tilde{Q}_{EA}$

Hierbei sind für die Pumpen zutreffende Nichtverfügbarkeiten durch eine Tilde gekennzeichnet.

Es fällt auf, dass kein RX-Minimalschnitt auftritt, der einen Pumpen-GVA und einen übergreifenden GVA beinhaltet, z. B. {GVAP12, ÜGVAD23}. Um die Auswirkungen dieser Näherung systematisch zu überprüfen, wurde ein Fehlerbaummodell mit ÜGVA der Diesel erstellt. Die resultierende Minimalschnittliste ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Minimalschnitte mit übergreifenden GVA sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet. Es ist angegeben, welcher oben angegebene RX-Minimalschnitt diese abdeckt. Alle Minimalschnitte haben 3 oder weniger Elemente. Zunächst wurde eine beispielhafte Quantifizierung durchgeführt, der die Annahme zugrunde liegt, dass übergreifende GVA 10 mal unwahrscheinlicher sind als nicht übergreifende GVA, die wiederum 10 mal unwahrscheinlicher sind als Einzelausfälle. Vereinfachend wurde für Einzelfehler eine Eintrittswahrscheinlichkeit in der Größenordnung 10^{-1} angenommen.

Tab. 3.1 Minimalschnitte des Fehlerbaums für Beispiel 4 mit ÜGVA der Diesel

Nr.	Gewicht für beispielhafte Quantifizierung	Basisereignis 1	Basisereignis 2	Basisereignis 3	Abgedeckt durch Minimalschnitt des Modells ohne ÜGVA	Abgedeckt durch RX-Minimalschnitt
1*	1E-3	ÜGVAD123				9
2	1E-3	EAD2	EAD3	EAP1	ja	
3	1E-3	EAD3	EAP1	EAP2	ja	
4	1E-3	EAD1	EAD2	EAD3	ja	
5	1E-3	EAP1	EAP2	EAP3	ja	
6	1E-3	EAD1	EAD2	EAP3	ja	
7	1E-3	EAD2	EAP1	EAP3	ja	
8	1E-3	EAD1	EAP2	EAP3	ja	
9	1E-3	EAD1	EAD3	EAP2	ja	
10	1E-3	EAP3	GVAP12		ja	
11	1E-3	EAP3	GVAD12		ja	
12	1E-3	EAD3	GVAP12		ja	
13	1E-3	EAD3	GVAD12		ja	
14*	1E-4	EAP3	ÜGVAD12			10
15*	1E-4	EAD2	ÜGVAD13			9
16*	1E-4	EAP2	ÜGVAD13			11
17*	1E-4	EAD1	ÜGVAD23			9
18*	1E-4	EAP1	ÜGVAD23			12
19*	1E-4	EAD3	ÜGVAD12			9
20*	1E-5	GVAD12	ÜGVAD13			9
21*	1E-5	GVAP12	ÜGVAD23			– fehlt –
22*	1E-5	GVAP12	ÜGVAD13			– fehlt –
23*	1E-5	GVAD12	ÜGVAD23			9
24*	1E-6	ÜGVAD12	ÜGVAD23			9
25*	1E-6	ÜGVAD12	ÜGVAD13			9
26*	1E-6	ÜGVAD13	ÜGVAD23			9

Die fehlenden Minimalschnitte sind das Zusammenwirken von einem GVA der Pumpen und einem übergreifenden GVA der Diesel, bei denen ein Strang sowohl durch Ausfall des Diesels als auch durch Ausfall der Pumpe unverfügbar ist. Dies leuchtet ein, da der

ÜGVA von Diesel 1 und 3 nur in einem X-Minimalschnitt auftauchen kann als Einzelausfall von Diesel 1 und Einzelausfall von Diesel 3. Bei gleichzeitigem GVA der Pumpen 1 und 2 ist dieser Schnitt nicht minimal, da bereits der GVA der Pumpen 1 und 2 zusammen mit dem Einzelausfall von Diesel 3 das TOP-Ereignis auslöst. Analoges ist auch vorstellbar für die Kombination zweier ÜGVA. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass ein solcher X-Minimalschnitt, in dem ein seltenes Ereignis (GVA) und ein sehr seltenes Ereignis (ÜGVA) bzw. zwei sehr seltene ÜGVA vorkommen, nur ein relativ geringes Gewicht haben. Wie man anhand der Näherung, die in der Vernachlässigung solcher RX-Minimalschnitte besteht, ein allgemeines Quantifizierungsverfahren entwickeln kann, wird in Abschnitt 3.5 diskutiert.

3.5 Quantifizierung von RX-Minimalschnitten

Die oben diskutierten Beispiele lassen erkennen, dass die exakte Quantifizierung von RX-Minimalschnitten sehr komplex ist. Wie im vorigen Kapitel mit Beispiel D dargestellt, ist die Abdeckung der Minimalschnitte des um ÜGVA erweiterten Fehlerbaums durch RX-Minimalschnitte nicht vollständig – einige X-Minimalschnitte geringer Wahrscheinlichkeit fehlen. Solche Abweichungen erscheinen aber tolerabel, da in verschiedenen anderen Aspekten (Quantifizierung der Zuverlässigkeitskenngrößen, Vernachlässigung Minimalschnitte geringer Wahrscheinlichkeit im Rahmen des Minimalschnittalgorithmus („cut-off“), Verzicht auf die Modellierung von Einrichtungen und Ausfallarten mit geringem Ergebniseinfluss usw.) erhebliche Abweichungen auftreten können. Deshalb erscheint es zielführend, einen einfach implementierbaren Algorithmus zur näherungsweise Quantifizierung der RX-Minimalschnitte zu entwickeln, der auf der Vernachlässigung der X-Minimalschnitte geringer Wahrscheinlichkeit beruht.

Hierzu sollen die weniger wahrscheinlichen X-Minimalschnitte vernachlässigt werden. Es sind dies X-Minimalschnitte, die

- mindestens einen ÜGVA und mindestens einen GVA oder
- mindestens einen ÜGVA und mindestens zwei Einzelausfälle oder
- mindestens zwei ÜGVA

enthalten. Übrig bleiben somit X-Minimalschnitte, die

- einen ÜGVA oder

- einen ÜGVA und einen Einzelausfall

beinhalten. Am Beispiel der X-Minimalschnitte in Tabelle 3.1 wären dies Zeilen 1 und 14 bis 19. Es ist erkennbar, dass diese ein wesentlich höheres Gewicht haben als die verbleibenden (Zeilen 20 bis 26). Der Faktor ist hier mindestens 10.

Konkret stellt sich die Quantifizierung für ein X-Basisereignisse mit k von r ausgefallenen Komponenten in RX-Minimalschnitten somit als die Summe der Wahrscheinlichkeit eines k von r-ÜGVA und aller möglichen Kombinationen eines k-1 von r-ÜGVA und eines Einzelausfalls dar. Dies sind gerade k mögliche Kombinationen. Also ist die Quantifizierung bei oben erläuteter Approximation durch die einfache Formel

$$Q_{X\text{-Basisereignis mit } k \setminus r}^{RX} = Q_{k \setminus r}^X + k Q_{(k-1) \setminus r}^X Q^{EA} \quad (3.21)$$

gegeben.

Somit kann zur Quantifizierung der übergreifenden GVA der Algorithmus aus Abschnitt 3.4 wie folgt modifiziert werden:

1. Führe für alle Minimalschnitte der Minimalschnittliste des TOP aus:
 - a) Ermittle, welche Komponentenausfälle innerhalb der ÜGVA-Gruppe den Basisereignissen des Minimalschnitts entsprechen.
 - b) Ist diese Anzahl der Komponentenausfälle kleiner 2 oder sind alle betroffenen Komponenten in einer GVA-Gruppe enthalten, so fahre mit dem nächsten Minimalschnitt fort.
 - c) andernfalls
 - i. ersetze in einer Kopie des Minimalschnitts alle Basisereignisse, die Ausfällen von Komponenten der ÜGVA-Gruppe entsprechen (GVA und Einzelausfälle), durch das entsprechende X-Basisereignis, z. B. {... GVAD12, EAD4, ...} durch {... ÜGVAD124, ...} oder {... EAD1, EAD4, EAD5, ...} durch {... ÜGVAD145, ...}
 - ii. falls der resultierende RX-Minimalschnitt noch nicht in der RX-Minimalschnittliste enthalten ist:
 1. nehme den RX-Minimalschnitt in die RX-Minimalschnittliste auf.
 - iii. Fahre mit dem nächsten Minimalschnitt fort

2. Führe für alle RX-Minimalschnitte m der RX-Minimalschnittliste aus:

- a. Berechne die Nichtverfügbarkeit Q_m als Produkt der Nichtverfügbarkeiten der Basisereignisse Q_b bzw. X-Basisereignisse⁷ Q_b^{RX} , wobei die Nichtverfügbarkeit eines X-Basisereignisses gemäß Gleichung 3.21 berechnet wird. Das bedeutet

$$Q_m = \prod_{\text{alle Basiserelemente } b \text{ aus } m} Q_b \prod_{\text{alle X-Basiserelemente } b \text{ aus } m} Q_b^{RX} \quad (3.22)$$

Zur Quantifizierung aller Beiträge ohne Beteiligung übergreifende GVA ist wie folgt vorzugehen:

3. Führe für alle Minimalschnitte der Minimalschnittliste aus:

- a. Berechne die Nichtverfügbarkeit als Produkt der Nichtverfügbarkeiten der Basisereignisse Q_b wobei die Zuverlässigkeitskenngrößen für nicht-übergreifende GVA bei Betrachtung übergreifender GVA, d. h. $Q_{k \setminus r}^{nX}$, verwendet werden, also

$$Q_m = \prod_{\text{alle Basiserelemente } b \text{ aus } m} Q_b \quad (3.23)$$

Die Gesamtwahrscheinlichkeit des TOP ist dann in erster Ordnung und Seltene-Ereignisse-Näherung („rare event approximation“) die Summe der Nichtverfügbarkeiten der Minimalschnittliste und die Summe der Nichtverfügbarkeiten der RX-Minimalschnittliste. Es gilt

$$q(TOP) = \sum_{\text{alle Minimalschnitte und RX-Minimalschnitte } m} Q_m \quad (3.24)$$

⁷ Der oben stehende Index RX verdeutlicht, dass das jeweilige X-Basisereignis als repräsentatives Basisereignis quantifiziert wird.

wobei Q_m die Unverfügbarkeit des Minimalschnitts bzw. RX-Minimalschnitts bezeichnet (Gleichungen 3.23 bzw. 3.22).

Die „min cut upper bound“-Näherung (siehe /SCA 12/) lässt sich ebenfalls anwenden: Die Gesamtwahrscheinlichkeit des TOP ergibt sich dann als:

$$Q^{TOP} = 1 - \prod_{\text{alle Minimalschnitte und RX-Minimalschnitte } m} (1 - Q_m) \quad (3.25)$$

Näherungen höherer Ordnung erscheinen ebenfalls grundsätzlich möglich, werden hier aber nicht diskutiert.

3.5.1 Erprobung des Verfahrens

Zur Erprobung des Verfahrens wurde eine Quantifizierung von Beispiel D mit auf der Betriebserfahrung basierenden Zuverlässigkeitskenngrößen durchgeführt. Diese Größen wurden im Fall der Einzelausfälle aus der ZEDB /VGB 12/ entnommen, im Fall der GVA für die Komponentenart „Pumpe“, für die hier keine übergreifenden GVA berücksichtigt wurden, aus dem Ergänzungsband zu Methoden- und Datenband des Facharbeitskreises Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke (FAK) /FAK 15/ bzw. für GVA und ÜGVA der Diesel mit den in Kapitel 2 entwickelten Methoden und Daten, die auf den Informationen der GVA-Datenbank der GRS basieren, geschätzt. Betrachtet wurde die Ausfallart „Betriebsversagen“. Es wurde wie üblich eine Missionsdauer von 10 Stunden angesetzt. Daraus ergeben sich folgende Nichtverfügbarkeiten:

Tab. 3.2 Zuverlässigkeitskenngrößen zur Quantifizierung von Beispiel D (Annahme: Missionsdauer 10 h)

Zuverlässigkeitskenngröße	Nichtverfügbarkeit	Quelle
Einzelausfall „großer“ Diesel	2,45E-02	/VGB 12/
Einzelausfall „kleiner“ Diesel	8,70E-03	/VGB 12/
Einzelausfall Pumpe	5,32E-03	/VGB 12/
GVA 2 von 2 Dieseln	1,49E-03	GRS
ÜGVA 2 von 3 Dieseln	4,81E-04	GRS
ÜGVA 3 von 3 Dieseln	1,14E-04	GRS
GVA 2 von 2 Kreiselpumpen	3,10E-05	/FAK 15/

Tab. 3.3 Quantifizierung des Fehlerbaums für Beispiel D mit ÜGVA der Diesel anhand aus der Betriebserfahrung geschätzter Zuverlässigkeitskenngrößen

Nr.	Wahrscheinlichkeit	Relatives Gewicht in %	Basisereignis 1	Basisereignis 2	Basisereignis 3	Abgedeckt durch Minimalchnitt des Modells ohne ÜGVA	Abgedeckt durch RX-Minimalchnitt
1	1,14E-04	61,62	ÜGVAD123				9
2	1,30E-05	7,01	EAD3	GVAD12		ja	
3	1,18E-05	6,37	EAD2	ÜGVAD13			9
4	1,18E-05	6,37	EAD1	ÜGVAD23			9
5	7,93E-06	4,28	EAP3	GVAD12		ja	
6	5,22E-06	2,82	EAD1	EAD2	EAD3	ja	
7	4,18E-06	2,26	EAD3	ÜGVAD12			9
8	3,19E-06	1,73	EAD1	EAD2	EAP3	ja	
9	2,56E-06	1,38	EAP2	ÜGVAD13			11
10	2,56E-06	1,38	EAP1	ÜGVAD23			12
11	2,56E-06	1,38	EAP3	ÜGVAD12			10
12	1,13E-06	0,61	EAD1	EAD3	EAP2	ja	
13	1,13E-06	0,61	EAD2	EAD3	EAP1	ja	
14*	7,17E-07	0,39	GVAD12	ÜGVAD13			9
15*	7,17E-07	0,39	GVAD12	ÜGVAD23			9
16	6,93E-07	0,37	EAD1	EAP2	EAP3	ja	

Nr.	Wahrscheinlichkeit	Relatives Gewicht in %	Basisereignis 1	Basisereignis 2	Basisereignis 3	Abgedeckt durch Minimalchnitt des Modells ohne ÜGVA	Abgedeckt durch RX-Minimalchnitt
17	6,93E-07	0,37	EAD2	EAP1	EAP3	ja	
18	2,70E-07	0,15	EAD3	GVAP12		ja	
19	2,46E-07	0,13	EAD3	EAP1	EAP2	ja	
20*	2,31E-07	0,13	ÜGVAD13	ÜGVAD23			9
21*	2,31E-07	0,13	ÜGVAD12	ÜGVAD23			9
22*	2,31E-07	0,13	ÜGVAD12	ÜGVAD13			9
23	1,65E-07	0,09	EAP3	GVAP12		ja	
24	1,51E-07	0,08	EAP1	EAP2	EAP3	ja	
25*	1,49E-08	0,01	GVAP12	ÜGVAD23			-fehlt-
26*	1,49E-08	0,01	GVAP12	ÜGVAD13			-fehlt-

Die Wahrscheinlichkeit des TOP-Ereignisses ist $1,85E-04$. Es ist erkennbar, dass gegenüber der Tabelle 3.1 die übergreifenden GVA ein höheres Gewicht haben. Demgegenüber haben die fehlenden Minimalschnitte ein kleines Gewicht (nur ein Anteil von $1E-4$ am Gesamtgewicht). Die in der oben entwickelten Approximation vernachlässigten Minimalschnitte sind in Tabelle 3.3 mit einem Stern (*) gekennzeichnet. Ihr Gesamtgewicht beträgt 1,19 %. Die Vernachlässigung von solch relativ unwahrscheinlichen Minimalschnitten spielt in der Praxis im Lichte sonstiger Unsicherheitsquellen keine Rolle.

3.6 Umgang mit Abschneidekriterien

Wie oben bereits erwähnt, muss verhindert werden, dass relevante Minimalschnitte von dem Algorithmus zur Fehlerbaum- bzw. Ereignisbaumauswertung vernachlässigt werden. Eine solche Vernachlässigung ist ohne Gegenmaßnahmen zu erwarten, da die relevanten Minimalschnitte mehrere GVA-Ereignisse bzw. Einzelfehler beinhalten können. Z. B. können für übergreifende GVA von Schaltern (als Betriebsmittel verschiedener Komponenten oder Kuppelschalter) einer Spannungsebene bis zu 7 verschiedene GVA-Komponentengruppen betroffen sein. Da GVA-Ereignisse selten und

somit GVA-Wahrscheinlichkeiten klein sind, ergeben sich für solche Minimalschnitte extrem kleine Wahrscheinlichkeiten.

Beim oben diskutierten Ansatz, die Menge der Minimalschnitte um X-Minimalschnitte zu ergänzen, kann wie folgt vorgegangen werden, um dies zu vermeiden:

Es wird jede verallgemeinerte Komponentengruppe, die ÜGVA repräsentiert, separat betrachtet. Die Nichtverfügbarkeit aller Basisereignisse für GVA und Einzelfehler, die Komponenten dieser Gruppe betreffen, wird auf 1 gesetzt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Minimalschnitte, die ÜGVA beinhalten, bei der Anwendung des Programms zur Fehlerbaum- bzw. Ereignisbaumauswertung nicht vernachlässigt werden können. Aus der Menge der so berechneten Minimalschnitte werden alle Minimalschnitte entnommen, die übergreifende GVA der betrachteten verallgemeinerten Komponentengruppe beinhalten, und der Liste der X-Minimalschnitte hinzugefügt. Die vom Fehlerbaum- bzw. Ereignisbaumauswertungsprogramm bestimmte Nichtverfügbarkeit eines solchen Minimalschnittes ist das Produkt der Nichtverfügbarkeit der Basisereignisse, die nicht zum ÜGVA beitragen, was für die Quantifizierung des X-Minimalschnittes benutzt werden kann.

Dies wird für alle verallgemeinerten Komponentengruppen, die ÜGVA repräsentieren, wiederholt. Auf diese Weise erhält man eine Liste aller zu ergänzenden X-Minimalschnitte.

Dieses Verfahren hat den potentiellen Nachteil, dass es nur eingeschränkt wirksam ist für Minimalschnitte, die zwei ÜGVA verschiedener verallgemeinerter Komponentengruppen enthalten (z. B. einen übergreifenden GVA der D1- und D2-Diesel und einen übergreifenden GVA der Notspeisepumpen und Sicherheitseinspeisepumpen). Dann wirkt das oben beschriebene Verfahren nur für eine der beiden verallgemeinerten Komponentengruppen. Eine mögliche Lösung ist, jeweils für *Paare* von verallgemeinerten Komponentengruppen das oben beschriebene Verfahren anzuwenden. Angesichts der Tatsache, dass die Wahrscheinlichkeiten von ÜGVA sehr klein sind, ist allerdings nicht zu erwarten, dass das gleichzeitige Auftreten von zwei ÜGVA einen wesentlichen Einfluss hat. Dies wäre allerdings noch zu verifizieren, wenn Zuverlässigkeitskenngrößen für übergreifende GVA für weitere Komponententypen zur Verfügung stehen.

3.7 Berücksichtigung der Unsicherheiten

Nach dem Stand von Wissenschaft und Technik sind Unsicherheiten in der PSA zu berücksichtigen. Dies umfasst insbesondere statistische Unsicherheiten der Zuverlässigkeitskenngrößen. Zur Unsicherheitsanalyse steht Standardsoftware wie RiskSpectrum® und Spezialsoftware wie die GRS-Software STREUSL zur Verfügung.

Alle oben beschriebenen quantitativen Berechnungen entsprechen – mit einer Ausnahme – von Ihrer Struktur her den sonst in der PSA durchgeführten, so dass die üblichen Rechenmethoden der genannten Software zum Einsatz kommen können.

Die einzige Abweichung bezieht sich auf die Quantifizierung der RX-Minimalschnitte. Hier tauchen abweichend im Produkt (Gleichung 3.22) nicht nur Nichtverfügbarkeiten, sondern auch gewichtete Summen von zwei Nichtverfügbarkeiten (siehe Gleichung 3.21) auf.

Wenn – wie in der PSA teilweise bis heute üblich – Lognormalverteilungen angesetzt werden, so lässt sich bei der Unsicherheitsanalyse ausnutzen, dass das Produkt von lognormalverteilten Größen (die Quantifizierungen der Minimalschnitte) wieder lognormalverteilt sind. Für die RX-Minimalschnitte gilt dies nicht.

Um dieses Problem zu umgehen, können die Produkte (Gleichung 3.22) „ausmultipliziert“ werden, so dass man wieder reine Produkte von Zuverlässigkeitskenngrößen, allerdings eine erhöhte Anzahl von repräsentativen Minimalschnitten (im Folgenden zur Vermeidung von Verwechslungen RX2 genannt), erhält.

Enthält z. B. ein RX-Minimalschnitt drei Basisereignisse:

- Einzelfehler Pumpe EAP: Nichtverfügbarkeit \tilde{Q}_{EA}
- 5 von 8-ÜGVA Diesel: ÜGVAD34568: approx. Nichtverfügbarkeit $Q_{5\setminus 8}^X + 5 Q_{4\setminus 8}^X Q^{EA}$
- 2 von 4-GVA Schalter GVAS12: Nichtverfügbarkeit $\hat{Q}_{2\setminus 4}$

So ergibt sich für den RX-Minimalschnitt {EAP, ÜGVAD34568, GVAS12}

$$Q_{\{EAP, \text{ÜGVAD34568}, \text{GVAS12}\}} = \tilde{Q}_{EA} (Q_{5\setminus 8}^X + 5 Q_{4\setminus 8}^X Q^{EA}) \hat{Q}_{2\setminus 4} \quad (3.26)$$

Dieser RX-Minimalschnitt lässt sich ersetzen durch zwei RX2-Minimalschnitte:

- RX2-Minimalschnitt {EAP, ÜGVAD34568-1, GVAS12}, dessen Quantifizierung das Produkt dreier Nichtverfügbarkeiten ist:

$$Q_{\{\text{EAP}, \text{ÜGVAD34568-1}, \text{GVAS12}\}} = \tilde{Q}_{EA} Q_{5 \setminus 8}^X \hat{Q}_{2 \setminus 4} \quad (3.27)$$

- RX2-Minimalschnitt {EAP, ÜGVAD34568-2, GVAS12}, dessen Quantifizierung das Produkt vierer Nichtverfügbarkeiten und einer Konstante ist:

$$Q_{\{\text{EAP}, \text{ÜGVAD34568-2}, \text{GVAS12}\}} = 5 \tilde{Q}_{EA} Q_{4 \setminus 8}^X Q^{EA} \hat{Q}_{2 \setminus 4} \quad (3.28)$$

Für die RX2-Minimalschnitte ist somit die bisherige Struktur wieder gegeben, so dass die bisherigen Verfahren zum Einsatz kommen können. Alternativ lassen sich numerische Algorithmen einsetzen, die auf die Struktur der RX-Minimalschnitte abgestimmt sind.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts sollte zunächst eine Vorgehensweise erarbeitet werden, wie Zuverlässigkeitskenngrößen für komponentengruppenübergreifende GVA aus der bestehenden Betriebserfahrung ermittelt werden können.

Hierzu wurde eine Methode zur Bestimmung von verallgemeinerten Komponentengruppen, für die GVA oder ÜGVA modelliert werden, ermittelt. Es wurden drei verschiedene Modelle entwickelt, um Ereignisse verallgemeinerten Komponentengruppen zuzuordnen, von denen allerdings nur zwei ohne umfangreichere Änderungen an den GRS-Rechenprogrammen unmittelbar verwendbar sind.

Da sofern möglich auf bereits bestehende Ereignisbewertungen durch Experten zurückgegriffen werden sollte, wurde ein Verfahren erarbeitet, wie bestehende Expertenbewertungen anzupassen sind, wenn das zugehörige GVA-Ereignis als komponentengruppenübergreifend eingestuft wird. Für sonstige Eingangsgrößen des GRS-Kopplungsmodells wurden ebenfalls Methoden und Gleichungen zur Anpassung an verallgemeinerte Komponentengruppen ermittelt.

Unter Verwendung des GRS-Kopplungsmodells, den GVA-Daten der deutschen Betriebserfahrung und den oben beschriebenen Methoden wurden Zuverlässigkeitskenngrößen für komponentengruppenübergreifende Ausfälle zwischen Notstrom- und Notspeisenotstromdieseln berechnet. Bei einem Vergleich der berechneten Zahlen zeigte sich, dass eine detailliertere Modellierung generell niedrigere Werte liefert als der „naive“ Ansatz einer 8er Gruppe von Dieseln kombiniert mit dem üblichen Verfahren für GVA. Ein Vergleich von verschiedenen GVA-Modellen zeigt, dass man mit dem deutschen Kopplungsmodell im Vergleich beispielweise mit dem international verbreiteten Alpha-Factor-Modell keine unangemessen konservativen Zahlenwerte erhält.

Für die Modellierung von komponentengruppenübergreifenden GVA, die eine große Anzahl von Komponenten betreffen, wurde zunächst der Ansatz verfolgt, bei der Quantifizierung der Minimalschnitte die Gewichtung einzelner Minimalschnitte zu modifizieren. Dieser Ansatz zeigte sich als nicht zielführend.

Stattdessen wurde eine alternative Vorgehensweise entwickelt und an einfachen Beispielen erprobt, bei der während der Quantifizierung der Minimalschnitte zusätzliche Minimalschnitte ergänzt werden, durch die komponentengruppenübergreifende GVA

berücksichtigt werden können. Es wurde ein Algorithmus entwickelt mit dem sich durch das Vernachlässigen von Ausfallkombinationen von geringem statistischem Gewicht der mathematische Aufwand bei der Ergänzung der Minimalschnitte in Grenzen hält. Die bisher verwendeten Softwarelösungen zur Unsicherheitsanalyse können weiterhin verwendet werden.

Nachdem die Quantifizierung der deutschen Betriebserfahrung im Hinblick auf komponentengruppenübergreifende GVA beispielhaft für die Komponententart Notstromdiesel durchgeführt wurde, sollten in Zukunft auch für andere Komponententarten, für die entsprechende Betriebserfahrung vorhanden ist, Zuverlässigkeitskenngrößen berechnet werden. Dies erfordert eine Auswertung der Betriebserfahrung der entsprechenden Komponententarten und eine Anpassung der übrigen Eingangsgrößen basierend auf den im Rahmen dieses Vorhabens erarbeiteten Verfahren.

Das Verfahren zur Ergänzung von repräsentativen komponentengruppenübergreifenden Minimalschnitten in den Minimalschnittlisten kann, sobald für alle relevanten Komponententarten komponentengruppenübergreifende Zuverlässigkeitskenngrößen bestimmt wurden, an Minimalschnittlisten, die auf realen Sicherheitssystemen bzw. realistischen Fehlerbäumen basieren, erprobt werden. Dabei sollte insbesondere die praktische Handhabung und Skalierbarkeit des Verfahrens unter realistischen Bedingungen geprüft werden.

Mittelfristig sollte eine (Teil-)Automatisierung des gesamten Vorgehens per Software angestrebt werden. Eine derartige Software müsste programmiert und entsprechende Schnittstellen mit den übrigen relevanten in der GRS verwendeten Softwarepaketen eingerichtet werden.

Literaturverzeichnis

- /CON 14/ Andrew O'Connor, Ali Mosleh, Center for Risk and Reliability, University of Maryland, College Park, United States:
Extending the Alpha Factor Model for Cause Based Treatment of Common Cause Failure Events in PRA and Event Assessment, Proceedings of the 12th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, Honolulu, Hawaii, USA, 2014.
- /CON 14a/ Andrew O'Connor, Ali Mosleh, Center for Risk and Reliability, University of Maryland, College Park, United States:
A General Cause Based Methodology for Analysis of Common Cause and Dependent Failures in System Risk and Reliability Assessments, Proceedings of the 12th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, Honolulu, Hawaii, USA, 2014.
- /FAK 05/ Facharbeitskreis probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke (FAK):
Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand August 2005, BfS-SCHR-37/05, Salzgitter, 2005.
- /FAK 05a/ Facharbeitskreis probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke (FAK):
Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand August 2005, BfS-SCHR-38/05, Salzgitter, 2005.
- /FAK 15/ Facharbeitskreis probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke (FAK):
Methoden und Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand Mai 2015, BfS-SCHR- 61/16, Salzgitter, 2016.
- /GAL 11/ Gallois, M., et al.:
Investigation of inter-system common cause failures: an update, Proceedings of the ANS PSA 2011 International Topical Meeting, American Nuclear Society, 2011.

- /HOL 06/ Holtschmidt, H., A. Kreuser, C. Versteegen:
Extension of the German Database for Common Cause Failure Events,
Kerntechnik, 71, No. 1-2, 22, 2006.
- /KRE 06a/ Kreuser, A., J. Peschke, J. C. Stiller:
Further Development of the Coupling Model, Kerntechnik, Vol. 71, S. 50-
53, 2006.
- /KRE 06b/ Kreuser, A., C. Versteegen, B. Schubert, R. Wohlstein:
Development and Structure of the German Common Cause Failure Data
Pool, Proceedings of the 9th International Conference on Probabilistic
Safety Assessment and Management, New Orleans, Louisiana, USA,
2006.
- /KRE 10/ Kreuser, A., C. Versteegen:
Common-Cause Failure Analysis – Recent developments in Germany,
Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Safety
Assessment and Management, Seattle, Washington, USA, 2010.
- /LEB 15/ Leberecht, M., J. C. Stiller, G. Gänßmantel, A. Wielenberg A. Kreuser,
C. Versteegen:
Entwicklung fortschrittlicher Methoden zur Identifizierung von Gruppen
von Komponenten mit GVA-Potenzial und zur Bewertung von teilweiser
Diversität, GRS-328, ISBN 978-3-944161-08-2, Gesellschaft für Anla-
gen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, 2015.
- /NRC 89/ US Nuclear Regulatory Commission (Hrsg.): Mosleh, A., et al.:
Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliabil-
ity Studies, NUREG/CR-4780, Vol. 1+2, 1989.
- /NRC 98/ US Nuclear Regulatory Commission (Hrsg.): Mosleh, A., D. M. Ras-
muson, F. M. Marshall:
Guidelines on Modeling Common-Cause-Failures in Probabilistic Risk
Assessment, NUREG/CR-5485, 1998.

- /NRC 07/ US Nuclear Regulatory Commission (Hrsg.):
Common-Cause Failure Database and Analysis System: Event Data Collection, Classification, and Coding, NUREG/CR-6268 Revision 1, 2007.
- /SCA 12/ Scandpower AB (Lloyd's Register Consulting):
RiskSpectrum Analysis, Tools Theory Manual, Version 3.2.1, 2012.
- /STI 08/ Stiller, J. C., A. Kreuser, C. Verstegen:
Consideration of Additional Uncertainties in the Coupling Model for the Estimation of Unavailabilities due to Common Cause Failures, Proceedings of the 9th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, Hong Kong, 2008.
- /STI 09/ Stiller, J. C., J. Peschke:
Konsistente Berücksichtigung der Unsicherheit bezüglich der Rate von GVA-Ereignissen bei der Anwendung des Kopplungsmodells, GRS-A-3466, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2009.
- /STI 14/ Stiller, J. C., S. Blum, A. Kreuser, M. Leberecht:
Weiterentwicklung des Quantifizierungsverfahrens für GVA zur Vermeidung von Schätzfehlern aufgrund vereinfachender Modellannahmen, GRS-322, ISBN 978-3-944161-02-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, 2014.
- /STI 15/ Stiller, J. C., M. Leberecht, G. Gänßmantel, A. Wielenberg A. Kreuser, C. Verstegen:
Common cause failures exceeding CCF groups, Proceedings of the 2015 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis (PSA 2015), Sun Valley, Idaho, USA, 2015.
- /STI 17/ Stiller, J. C., M. Leberecht, A. Kreuser:
Entwicklung von Methoden zur Berücksichtigung über-greifender GVA in der PSA, GRS-A-3895, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, 2017.

- /VGB 12/ VGB PowerTech:
Zentrale Zuverlässigkeits- und Ereignisdatenbank Zuverlässigkeitskenn-
größen für Kernkraftwerkskomponenten, ZEDB-Auswertung 2012.
- /VIV 08/ Vives, P., Primet, J., Canavan, K., Vanover, D. E.:
Investigation of inter-system common cause failures, Proceedings of the
2015 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment
and Analysis (PSA 2008), Knoxville, Tennessee, USA, 2008.
- /WOL 15/ Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 10.1, 2015.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Beispielhafte Zuordnung von GVA-Ereignissen zu verschiedenen Komponentengruppen	4
Abb. 2.2	Beispiel für die Modellierung eines komponentengruppenübergreifenden GVA im Fehlerbaum	5
Abb. 3.1	Betrachtete Komponenten und verallgemeinerte Komponentengruppen von Beispiel A	53
Abb. 3.2	Fehlerbaum des TOP-Ereignisses „Ausfall aller drei Diesel“ ohne ÜGVA	53
Abb. 3.3	Fehlerbaum des TOP-Ereignisses „Ausfall aller drei Diesel“ mit Berücksichtigung übergreifender GVA. Basisereignisse für übergreifende GVA sind gelb hervorgehoben.	54
Abb. 3.4	Verallgemeinerte Komponentengruppen für GVA und ÜGVA für Beispiel B	59
Abb. 3.5	Verallgemeinerte Komponentengruppen für GVA und ÜGVA für Beispiel C mit zwei Gruppen zu je 2 identischen Dieseln und einer verallgemeinerten Komponentengruppe aller 4 teildiversitären Diesel	61
Abb. 3.6	Fehlerbaum des Systems aus Abbildung 3.5 bei Modellierung übergreifender GVA.....	62
Abb. 3.7	Verallgemeinerte Komponentengruppen für GVA und ÜGVA für Beispiel D	68

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Übersicht über die Beiträge der einzelnen Anlagen zur Beobachtungszeit	24
Tab. 2.2	Beobachtungszeiten nach Ausfallart	24
Tab. 2.3	Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü1 aus den bestehenden Expertenbewertungen der Ereignisse E1a und E1b.....	26
Tab. 2.4	Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü2 aus den bestehenden Expertenbewertungen des Ereignisses E2.....	27
Tab. 2.5	Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü3 aus den bestehenden Expertenbewertungen der Ereignisse E3a und E3b.....	28
Tab. 2.6	Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü4 aus den bestehenden Expertenbewertungen der Ereignisse E4a und E4b.....	30
Tab. 2.7	Synthese der komponentengruppenübergreifenden Expertenbewertungen Ü5 aus den bestehenden Expertenbewertungen des Ereignisses E5.....	31
Tab. 2.8	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für komponentengruppenübergreifende GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen mit dem Modell 1	32
Tab. 2.9	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 8er Komponentengruppe als Vergleichswerte	32
Tab. 2.10	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 4er Komponentengruppe unter gleichzeitiger Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA mit dem Modell 1	34
Tab. 2.11	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 4er Komponentengruppe ohne Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA als Vergleichswerte	34

Tab. 2.12	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für komponentengruppenübergreifende GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht mit dem Modell 1	35
Tab. 2.13	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 8er Komponentengruppe als Vergleichswerte	36
Tab. 2.14	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 4er Komponentengruppe unter gleichzeitiger Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA mit dem Modell 1	37
Tab. 2.15	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 4er Komponentengruppe ohne Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA als Vergleichswerte	38
Tab. 2.16	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für komponentengruppenübergreifende GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen mit dem Modell 2	39
Tab. 2.17	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 8er Komponentengruppe als Vergleichswerte	40
Tab. 2.18	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 4er Komponentengruppe unter gleichzeitiger Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA mit dem Modell 2	41
Tab. 2.19	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Betriebsversagen in einer 4er Komponentengruppe ohne Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA als Vergleichswerte	41
Tab. 2.20	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für komponentengruppenübergreifende GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht mit dem Modell 2	43
Tab. 2.21	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 8er Komponentengruppe als Vergleichswerte	44

Tab. 2.22	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 4er Komponentengruppe unter gleichzeitiger Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA mit dem Modell 2.....	45
Tab. 2.23	Ergebnisse der PEAK-Berechnung für GVA-Wahrscheinlichkeiten der Ausfallart Startet nicht in einer 4er Komponentengruppe ohne Annahme von komponentengruppenübergreifenden GVA als Vergleichswerte	45
Tab. 2.24	Nichtverfügbarkeit durch Übergreifende GVA, Leistungsbetrieb, Betriebsversagen, Erwartungswerte der Ausfallrate in 1/h	48
Tab. 3.1	Minimalschnitte des Fehlerbaums für Beispiel 4 mit ÜGVA der Diesel.....	70
Tab. 3.2	Zuverlässigkeitskenngrößen zur Quantifizierung von Beispiel D (Annahme: Missionsdauer 10 h)	75
Tab. 3.3	Quantifizierung des Fehlerbaums für Beispiel D mit ÜGVA der Diesel anhand aus der Betriebserfahrung geschätzter Zuverlässigkeitskenngrößen	75

**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

ISBN 978-3-946607-46-5