

Verifizierung von Analysesimulatoren

Verifizierung von Analysesimulatoren

Bericht zum Arbeitspaket 1

Vertiefte und generische
Auswertung von Betriebs-
erfahrungen –
neue Bewertungsmethoden
und Störfallanalyseverfahren

Simone Palazzo
Vera Koppers
Yixiang Liao

März 2018

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrundeliegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4715R01345 durchgeführt.

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

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

GRS - 488
ISBN 978-3-946607-73-1

Deskriptoren:

ATHLET/ATLAS, Analysesimulatoren, Verifizierungsverfahren

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Eigenforschungsvorhabens wurde eine einheitliche Vorgehensweise entwickelt, mit der die Analysesimulatoren weitestgehend abdeckend verifiziert werden können. Hierzu wurde ein Mindestsatz an Ereignisanalysen definiert, mit dem es möglich ist, die korrekte Nachbildung der betrieblichen Systeme / Komponenten, Begrenzungs- und Sicherheitssysteme in ihren unterschiedlichen Zuständen zu zeigen. Eine Liste von Ereignissen wurde erstellt, auf deren Basis das Verifizierungsverfahren durchgeführt wurde. Aufgrund des hohen Komplexitätsgrads des Eingabedatensatzes wurde das Verifizierungsverfahren im Wesentlichen in drei Schritte eingeteilt, mit dem Ziel die unterschiedlichen Teile des Datensatzes bzw. die einzelnen Systeme des Analysesimulators schrittweise in einem höheren Untersuchungsgrad zu analysieren und zu verifizieren.

- In Phase 1 wurde geprüft, ob Energie- und Massenbilanzen auf der Primär- und Sekundärseite ausgeglichen sind.
- In der nachfolgenden Phase 2 wurden die wesentlichen Funktionen einzelner Systeme geprüft. Das betrifft sowohl die betrieblichen Systeme als auch die Begrenzungssysteme (u. a. MADTEB, RELEB).
- In Phase 3 des Verfahrens wurden die Sicherheitssysteme (u. a. Reaktorschutzsystem) sowie das Zusammenwirken zwischen den verschiedenen Systemen überprüft.

Als Bewertungsbasis für die Überprüfung der Funktionalität der im Analysesimulator-Eingabedatensatz implementierten Betriebs- und Sicherheitssysteme wurden Informationen aus folgenden Quellen herangezogen:

- Vorliegende anlagespezifische Dokumentationen (Betriebs- und Sicherheitssysteme),
- Ergebnisse der vom Betreiber durchgeführten Rechnungen (z. B. im Rahmen der anlagespezifischen Sicherheitsstatusanalyse),
- Informationen aus verfügbaren Schulungsunterlagen bzw. vom Störfallanalysehandbuch-Projekt (Vorhaben 3612R01335).

Insgesamt 19 Simulationen wurden für das Verifizierungsverfahren für die wesentlichen Ereignisse der Sicherheitsebenen (SE) 2 bis 4a durchgeführt. Nach der Durchführung jeder Rechnung erfolgte die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Daten aus der Bewertungsbasis. Waren die wesentlichen Anlageparameter bzw. deren zeitliche Verläufe ähnlich bzw. vergleichbar mit denen aus der Bewertungsbasis, war keine weitere Anpassung spezifischer Funktionen im existierenden Modell des Analysesimulators notwendig. Bei der Feststellung von Abweichungen zwischen den berechneten und den aus der Bewertungsbasis herausgezogenen Ergebnisse, erfolgt eine Anpassung des Modells und die Behebung der Abweichungen.

Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Verifizierungsverfahren ermöglicht die Einhaltung einer hohen Qualität der Datensätze und, falls erforderlich, eine Verbesserung der im Datensatz des Analysesimulators implementierten betrieblichen und sicherheitstechnischen Systeme bzw. Komponenten. Das Vorhaben hat wesentlich zur Identifizierung des Weiterentwicklungsbedarfs für die Erweiterung von Modellen in den anlagenspezifischen Datensätzen für die Analyse von thermohydraulischen Phänomenen beigetragen.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
1	Zielsetzung.....	1
1.1	Gliederung des Arbeitsprogramms	2
2	Ergebnisse des Arbeitsprogramms.....	5
2.1	Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik	5
2.2	Definition einer Auswahl von Ereignissen für die Verifizierung einschließlich Schaffung der Bewertungsbasis	7
2.3	Prüfung der ausgewählten Ereignisse anhand der Ereignislisten unter Anwendung des Vorkonvoi-Analysesimulators	15
2.3.1	Rechnung der Phase 2	15
2.3.2	Rechnungen der Phase 3	18
3	Ansätze zur Weiterentwicklung für ein automatisiertes Verfahren ...	27
4	Zusammenfassung	31
	Abbildungsverzeichnis.....	35
	Tabellenverzeichnis.....	37
	Literaturverzeichnis.....	39
	Abkürzungsverzeichnis.....	41

1 Zielsetzung

In den Vorhaben werden Arbeiten zur „Entwicklung von Programmen für Störfall- und Unfallanalysen unter Nutzung der Betriebserfahrung“ durchgeführt. Die Arbeiten untergliedern sich in folgende Arbeitspakete:

- Arbeitspaket 5.1 „Verifizierung von Analysesimulatoren“
- Arbeitspaket 5.2 „Ergänzung der bestehenden PSA der Stufe 2“
- Arbeitspaket 5.3 „Untersuchungen zur deterministischen Bewertung der Einwirkungen aus Gasfreisetzungen und chemischen Explosionen“
- Arbeitspaket 5.4 „Generische Untersuchungen zu den Zuständen im Ringraum eines DWR KONVOI unter unfallbedingt erhöhten Leckagen aus dem Sicherheitsbehälter (SB) und Ableitung von potentiellen Notfallmaßnahmen zur Schadensbegrenzung“

Der vorliegende Bericht dokumentiert abschließend die Arbeiten im Arbeitspaket 5.1 „Verifizierung von Analysesimulatoren“ vom Vorhabensbeginn im März 2015 bis zum Vorhabensende im März 2018.

Die GRS entwickelt und wendet anlagenspezifische Analysesimulatoren an, um das komplexe thermohydraulische und leittechnische Anlagenverhalten für anomale Betriebszustände, Störfälle und auslegungsüberschreitende Störfälle analysieren zu können.

Die Basis für diese Analysen stellen Eingabedatensätze dar, die für ein konkretes Kernkraftwerk und zur Anwendung mit dem jeweiligen Rechenprogramm der GRS (z. B. ATHLET) entwickelt wurden. Um eine hohe Aussagesicherheit des simulierten Anlagenverhaltens zu erzielen, kommt dem Arbeitsschritt der Verifizierung dieser Datensätze eine hohe Bedeutung zu. Unter Verifizierung wird in diesem Zusammenhang eine umfassende systematische Vorgehensweise verstanden, welche die Prüfung der Korrektheit des Modells gegen eine definierte Bewertungsbasis beschreibt.

Ziel des Vorhabens war daher eine einheitliche Vorgehensweise zu entwickeln, mit dem Analysesimulatoren weitestgehend abdeckend verifiziert werden können. Hierzu wurde ein Mindestsatz an Ereignisanalysen definiert, mit dem es möglich ist, die korrekte Nachbildung der betrieblichen Systeme/Komponenten, Begrenzungssysteme und

der Sicherheitssysteme in ihren unterschiedlichen Zuständen zu zeigen. Die Entwicklung eines solchen Verifizierungsverfahrens ist notwendig, da die Qualifizierung der Analysesimulatoren bislang nicht nach einem einheitlichen Verfahren (wie z. B. für Rechenprogramme) erfolgt, sondern auf Basis von einzelnen Analysen, die in der Vergangenheit im Hinblick auf die geplante Anwendung bzw. auf die verfügbaren Vergleichsdaten ausgewählt wurden.

Mit den Arbeiten wurde ferner sichergestellt, dass auch Ereignisse aus der Betriebserfahrung, welche keine Auslegungsstörfälle bzw. bei der Verifizierung des Simulators verwendete Transienten sind, durch die Systemmodelle im Analysesimulator korrekt wiedergegeben werden können. Die Anwendung des entwickelten Verifizierungsverfahrens wird am Vorkonvoi-Analysesimulator der GRS gezeigt.

Als Ergebnis der Anwendung des Verifizierungsverfahrens steht für die wesentlichen Ereignisse der Sicherheitsebenen (SE) 2 bis 4a ein verifizierter Analysesimulator zur Bearbeitung von ad-hoc Fragestellungen für einen breiteren Anwenderkreis in der GRS zur Verfügung.

1.1 Gliederung des Arbeitsprogramms

Die Arbeiten gliedern sich in fünf Arbeitsschritte:

1. Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik und Ergebniszusammenstellung
2. Definition einer Auswahl von Ereignissen für die Verifizierung einschließlich Schaffung der Bewertungsbasis
3. Anwendung des Vorkonvoi-Simulators für die ausgewählten Ereignisse
4. Prüfung der ausgewählten Ereignisse anhand der Ereignislisten
5. Zusammenführung der Ergebnisse und Dokumentation der Vorgehensweise zur Verifikation von Analysesimulatoren

Der für die Bearbeitung des Vorhabens relevante Stand von Wissenschaft und Technik wird systematisch aufbereitet und um die im Projekt gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen ergänzt.

Die Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bezieht sich u. a. auf:

- bisherige Arbeiten des Auftragnehmers: Methoden, Daten, Vorgehensweisen und Ergebnisse;
- wichtige Untersuchungen und Ergebnisse anderer Stellen (abgeschlossene sowie laufende Arbeiten, Literaturrecherche);
- Sichtung der aktuellen relevanten Informationssysteme;
- Ergebnisse aktueller Beratungen in einschlägigen nationalen und internationalen Gremien;
- vorhandene Bewertungsmaßstäbe, die dem Vorhaben zugrunde liegen und
- bewährte Vorgehensweisen ("Best Practices").

Auf Grundlage der bisherigen Erfahrungen aus der Qualifizierung der Analysesimulatoren der GRS wird eine Auswahl von Ereignissen definiert, an denen der Verifizierungsprozess angewandt werden soll. Dabei wird erfasst, welche Systeme des Analysesimulators bei diesen Ereignissen verifiziert werden können. Zu diesen ausgewählten Ereignissen wird anschließend die Bewertungsbasis festgelegt. Grundsätzlich können hierfür Informationen unterschiedlicher Güte vorliegen:

- a) Anlagenmessdaten zu aufgetretenen Betriebsstörungen, Transienten oder Inbetriebsetzungsversuchen stellen Informationen von sehr hoher Güte dar. Dabei ist allerdings zu prüfen, inwieweit die verfügbaren Messdaten aufgrund zwischenzeitlich möglicher Anlagenmodifikationen (Leistungserhöhung etc.) noch anwendbar sind.
- b) Ergebnisse anderer (unabhängiger) Analysen (z. B. Rechnungen aus Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren, Ergebnisse von anderen Anlagensimulationen) stellen Vergleichsdaten dar.
- c) Eine Vergleichsbasis auf Grundlage des BHB, der vorliegenden Anlagendokumentation oder von weiteren Informationen wie aus Schulungsunterlagen wird dann herangezogen, sofern eine Bewertung durch a) und b) nicht möglich ist.

Zu den ausgewählten Ereignissen wird schließlich für den Vorkonvoi-Analysensimulator der GRS die verfügbare Bewertungsbasis ermittelt, zusammengestellt und für die weitere Verwendung im folgenden Arbeitsschritt bereitgestellt.

2 Ergebnisse des Arbeitsprogramms

2.1 Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

Ziel des ersten Arbeitsschrittes ist die Sammlung von spezifischen Informationen, auf deren Basis die Erstellung einer Vorgehensweise für die Verifizierung eines Eingabedatensatzes durchgeführt werden kann.

Für die Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik wurden bisherige Arbeiten der GRS herangezogen sowie bewährte Vorgehensweisen, die beispielsweise in Richtlinien der IAEA veröffentlicht sind, berücksichtigt. Darüber hinaus wurden für die Erstellung des Verifizierungsverfahrens weitere Analyseergebnisse und -erkenntnisse genutzt, die während laufender nationaler und internationaler Projekte /GRS 15/, /KFD 12/ herausgearbeitet wurden.

Zur Qualitätssicherung von Sicherheitsanalysen empfiehlt die IAEA ein standardisiertes Verfahren, das zum einen die Güte der Simulationsergebnisse sicherstellt und zum anderen die Anforderungen an die Anlage berücksichtigt /IAE 09/. Nach Verifikation der verwendeten Anlagen- bzw. Eingabedaten bedarf es laut IAEA einer Über- sowie Gegenprüfung des Datensatzes, um Fehler aus der Entwicklungsphase zu korrigieren. Zudem sind die angewandten Anlagenmodelle zu validieren /IAE 09/. Die praktische Vorgehensweise für die Verifizierung eines Datensatzes wird von der IAEA offen gelassen.

In /PET 08/ wird eine Übersicht über das Validierungsverfahren des in der Sicherheitsanalyse angewendeten Rechencodes sowie der anlagenspezifischen Datensätze vorgestellt. Die Autoren stellen fest, dass bezüglich der Validierung der Datensätze eine Kontrolle über die implementierte Nodalisierung notwendig ist, um die Wirkung vieler verschiedener Näherungsquellen wie die folgenden zu berücksichtigen:

- Die Daten der Referenzanlage, die dem Benutzer zur Verfügung stehen, sind in der Regel nicht ausführlich, um eine perfekte „Schematisierung“ der Referenzanlage zu reproduzieren;
- Aus den verfügbaren Daten leitet der Benutzer eine approximierete Nodalisierung der Anlage ab, wodurch der Detailgrad reduziert wird.

Demzufolge wird in der o. g. Veröffentlichung eine Prozedur für die Validierung der Datensätze vorgeschlagen, mit dem Ziel die Qualitätssicherung des Datensatzes zu gewährleisten. Das Verfahren erfasst unterschiedliche Arbeitsschritte, die sich auf die korrekte Nachbildung eines breiten Spektrums von thermo-hydraulischen Phänomenen fokussieren. Am Ende des Verfahrens verfügt man über einen qualifizierten anlagen-spezifischen Datensatz, der für die Analyse von spezifischen Transienten bzw. Störfällen geeignet ist. Damit der Datensatz ein breiteres Spektrum von Transienten bzw. Störfällen abdecken kann, wird der in /PET 08/ definierte „On transient level qualification“-Arbeitsschritt im Verfahren mehrmals durchgeführt. Das führt zu einer Steigerung des Analyseaufwands aufgrund der kontinuierlichen Prüfung der Ergebnisqualität gegenüber einer Bewertungsbasis sowie zu einer Wiederholung der im Verfahren vorgesehenen Arbeitsschritte aufgrund des darauffolgenden Verbesserungsbedarfs im Datensatz (z. B. Anpassung bzw. Verfeinerung der Nodalisierung einzelner Thermofluidobjekte).

Die Validierung des Eingabedatensatzes soll sicherstellen, dass das entwickelte Modell alle Funktionen der einzelnen modellierten Systeme adäquat darstellen kann. Die Validierung erfolgt durch einen Vergleich zwischen den Anlagedaten und den Analyseergebnissen der mit dem Analysesimulator nachberechneten Ereignisse nach dem Ablauf einer Transiente bzw. eines Störfalles.

Die Verifizierung eines Datensatzes stellt ferner sicher, dass die thermohydraulische Nodalisierung sowie die Nachbildung der leittechnischen Funktionen für jedes einzelne System im Eingabedatensatz den Anlagenspezifikationen bzw. der Anlagendokumentation entsprechen.

In bisherigen GRS-Projekten wurde weitestgehend nur eine Validierung der Datensätze verschiedener GRS-Analysesimulatoren durchgeführt. Die Validierung erfolgte im Wesentlichen anhand von Nachrechnungen experimenteller Versuche und von in realen Anlagen abgelaufenen Ereignissen, für die Anlagenmessdaten zur Verfügung gestellt wurden. Die Anzahl der durchgeführten Ereignisse ist jedoch nicht ausreichend für die Funktionalitätsprüfung der betrieblichen und sicherheitstechnischen Systeme in Analysesimulatoren.

Eine partielle Verifizierung der Eingabedatensätze fand bisher nur insoweit statt, dass ausgewählte Transienten und Störfälle simuliert wurden und das beobachtete Verhalten der Systeme mit dem auf Basis der Anlagendokumentation erwarteten Verhalten der Systeme verglichen wurde.

Eine abdeckende Verifizierung der Eingabedatensätze ist allerdings für die Analysesimulatoren erforderlich, um die korrekte Funktion aller Systeme der Analysesimulatoren sicherzustellen.

2.2 Definition einer Auswahl von Ereignissen für die Verifizierung einschließlich Schaffung der Bewertungsbasis

Das Hauptziel des durchgeführten Arbeitsschritts ist die Erstellung einer Liste von Ereignissen auf deren Basis das Verifizierungsverfahren durchzuführen ist. Die richtige Auswahl der Ereignisse stellt die wesentliche Grundlage für die erfolgreiche Methodenentwicklung im vorliegenden Projektvorhaben dar.

Aufgrund des hohen Komplexitätsgrads des Eingabedatensatzes wurde das Verfahren im Wesentlichen in drei Schritte eingeteilt, mit dem Ziel, die unterschiedlichen Teile des Datensatzes bzw. die einzelnen Systeme des Analysesimulators schrittweise in einem höheren Untersuchungsgrad zu analysieren und zu verifizieren. Die Einzelschritte berücksichtigen darüber hinaus die im technischen Sicherheitskonzept definierten Sicherheitsebenen (SE), weshalb diese im Folgenden kurz aufgelistet werden /BMU 15/, /GRS 11/:

SE-1	Normalbetrieb (bestimmungsgemäßer Betrieb, ungestört)
SE-2	anormaler Betrieb (bestimmungsgemäßer Betrieb, Störung)
SE-3	Störfälle
SE-4a	sehr seltene Ereignisse
SE-4b	Ereignisse mit Mehrfachversagen von Sicherheitseinrichtungen
SE-4c	Unfälle mit schweren Brennelementschäden

Die Nachweisführung über das Einhalten der Schutzziele findet für die Sicherheitsebenen 2 bis 4a statt /SIA 12/. In den Regelwerksanforderungen für Ereignisanalysen der jeweiligen Sicherheitsebene gelten spezifische Randbedingungen, die während der Erstellung des Störfallanalysehandbuchs aufbereitet wurden und dort nachzulesen sind (siehe /GRS 11/). Diese bilden eine Ereignisliste, aus dem im Rahmen dieses Vorhaben innerhalb der drei definierten Phasen eine Teilauswahl an Ereignissen getroffen

werden kann. Darüber hinaus können weitere Ereignisse oder Änderungen in den Datensatzparametern für die Rückschlüsse auf die Güte des Datensatzes von Bedeutung sein.

Die drei Phasen teilen sich wie folgt auf:

In **Phase 1** des Verfahrens wird geprüft, ob die Energie- und Massenbilanzen auf Primär- und Sekundärseite ausgeglichen sind. Auf diese Weise können Unregelmäßigkeiten in den einzelnen thermohydraulischen Parametern sowie Abweichungen zwischen den systemspezifischen Regelungen frühzeitig entdeckt und ein negativer Einfluss auf die Simulation der Transienten verhindert werden. Aus diesem Grund konzentriert sich die erste Phase auf eine störungsfreie Simulation. Der Analysesimulator berechnet hierzu das Anlagenverhalten bei konstanten 100 % Leistung über eine Zeitdauer von 2 bis 3 h. Die Verifizierung des stabilen Zustands der physikalischen Parameter im Analysesimulator erfolgt durch einen Vergleich zwischen den berechneten Werten wichtiger Anlageparameter und den Daten aus der Anlagendokumentation.

In der nachfolgenden **Phase 2** des Verfahrens werden die wesentlichen Funktionen der einzelnen Systeme geprüft. Das betrifft sowohl die betrieblichen Systeme als auch die Begrenzungssysteme (u. a. MADTEB, RELEB), die im Analysesimulator berücksichtigt sind. In dieser Hinsicht sollen Transienten berechnet werden, welche die thermodynamische Wechselwirkung zwischen Primär- und Sekundärseite beeinflussen und Ungleichheiten oder Veränderungen der wesentlichen Anlagenparameter hervorrufen. Hierzu werden Ereignisse der SE-2 in dieser Phase mit dem Analysesimulator betrachtet.

In **Phase 3** des Verfahrens sollen die Sicherheitssysteme (u. a. Reaktorschutzsystem) sowie das Zusammenspiel zwischen den verschiedenen Systemen überprüft werden. Die Berechnung von Ereignissen der SE-2 bis 4a mit dem Analysesimulator wird in dieser Phase betrachtet. Die ausgewählte Liste von Ereignissen soll das Betriebsspektrum der einzelnen Systeme möglichst breit abdecken können; es werden nämlich Störungen der Reaktivität, der Kernkühlung, der Wärmeabfuhr sowie Unterkühlungstransienten, Kühlmittelverluststörfälle und Betriebsstörungen ohne Schnellabschaltung berücksichtigt.

Für die Erstellung der Ereignisliste werden grundsätzlich Informationen über den zeitlichen Ablauf wesentlicher anlagenspezifischer Parameter sowie über die Auslösung von Begrenzungs- sowie Reaktorschutzsignalen von berechneten Transienten bzw. Störfällen aus dem Störfallanalysehandbuch /GRS 14a/ herausgezogen. Um das Spektrum von Ereignissen auszuweiten, werden zusätzliche Informationen über die Simulationsabläufe aus den Schulungsunterlagen verwendet /KSG 14/. Eine Vergleichsbasis auf Grundlage des BHB, der vorliegenden Anlagedokumentation oder von weiteren Informationen (u. a. anlagenspezifischer Sicherheitsstatusanalyse-Bericht /KBR 06/) wird dann herangezogen, sofern die Bewertung durch die vorhergenannten Optionen nicht möglich ist.

Die oben erwähnten Unterlagen stellen eine wichtige Grundlage dar, um das dynamische Verhalten der Anlage im anomalen Betrieb zu verstehen und das Zusammenspiel verschiedener betrieblicher Systeme sowie Begrenzungs- und Schutzsysteme klarzustellen. Das Verständnis der Funktionalität der diversen Systeme während eines Transienten- bzw. Störfallablaufs dient dazu, die Anzahl von Ereignissen für das Verifizierungsverfahren so weit wie möglich zu begrenzen. Ziel ist es, die Funktionalität verschiedener Betriebs- sowie Sicherheitssysteme während der Durchführung einzelner Rechnungen gleichzeitig zu prüfen. Eine solche Einschränkung der Anzahl von Ereignissen ist notwendig, um das Verifizierungsverfahren flexibel und einfach anwendbar zu halten.

Die Verifizierung der korrekten Nachbildung der betrieblichen Systeme und Komponenten sowie der Begrenzungs- und Sicherheitssysteme im ATHLET-Eingabedatensatz erfolgt durch einen Vergleich zwischen dem im Datensatz implementierten leittechnischen Modell und den Informationen aus der anlagenspezifischen Systembeschreibung bzw. aus den systemspezifischen leittechnischen Schemen. In Ermangelung an anlagenspezifischen Informationen über einzelne implementierte Systeme wurden leittechnische Schaltschemen für Schutzsignale und Komponenten aus anderen Anlagebeschreibungen ähnlicher Bauart (Vorkonvoi) verwendet.

Die Liste von Ereignissen für das Verifizierungsverfahren ist in Tab. 2.1 definiert. Im Anhang dieser Liste werden insgesamt 19 Simulationen für das Verifizierungsverfahren durchgeführt.

Die Ereignisse wurden für jede Phase des Verifizierungsverfahrens mit einem steigenden Grad an Komplexität bezüglich des Ansprechens von Begrenzungseinrichtungen bzw. Schutzkriterien ausgewählt. Für Phase 3 des Verifizierungsverfahrens werden Ereignisse berücksichtigt, in denen ein komplexes Zusammenspiel diverser Betriebs- und Sicherheitssysteme für die Beherrschung des Störfalles zu betrachten ist.

Eine schematische Darstellung des entwickelten Verifizierungsverfahrens ist in Abb. 2.1 gezeigt. Es handelt sich im Wesentlichen um ein iteratives Verfahren, in dem der für die Verifizierung ausgewählte Datensatz eines Analysesimulators schrittweise überprüft und entsprechend aktualisiert wird. Eine aktuell vorhandene Version des Analysesimulators wird zuerst aus dem SVN-Repository herausgezogen und dient als Basis für die Durchführung unterschiedlicher Rechnungen aus der Simulationsmatrix. Diese Version wird erstmals für die Rechnung der Phase 1 angewendet (siehe Block „Anwendung des Modells“). Nach der Durchführung der ersten Rechnung (siehe Block „Durchführung der Rechnung“) erfolgt die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Daten aus der Bewertungsbasis (siehe Block „Verifizierung der Rechnung“). Sind die wesentlichen Anlageparameter bzw. deren zeitlichen Verläufe ähnlich bzw. vergleichbar mit denen aus der Bewertungsbasis (siehe Block „Check“), wird keine Anpassung spezifischer Funktionen im existierenden Modell des Analysesimulators notwendig. Somit kann der Datensatz für die darauffolgenden Schritte (Rechnung aus Phase 2 oder 3) angewendet werden. Bei der Feststellung von Abweichungen zwischen den berechneten und den aus der Bewertungsbasis herausgezogenen Ergebnissen erfolgt eine Anpassung des Modells, in dem eine Unstimmigkeit festgestellt wurde. Falls eine Überarbeitung des thermohydraulischen Modells einzelner Objekte bzw. eine Neuimplementierung von leittechnischen Funktionen für die Durchführung der Rechnung notwendig ist, wird die entsprechende Version des Datensatzes überarbeitet und die Simulationen werden neu durchgeführt.

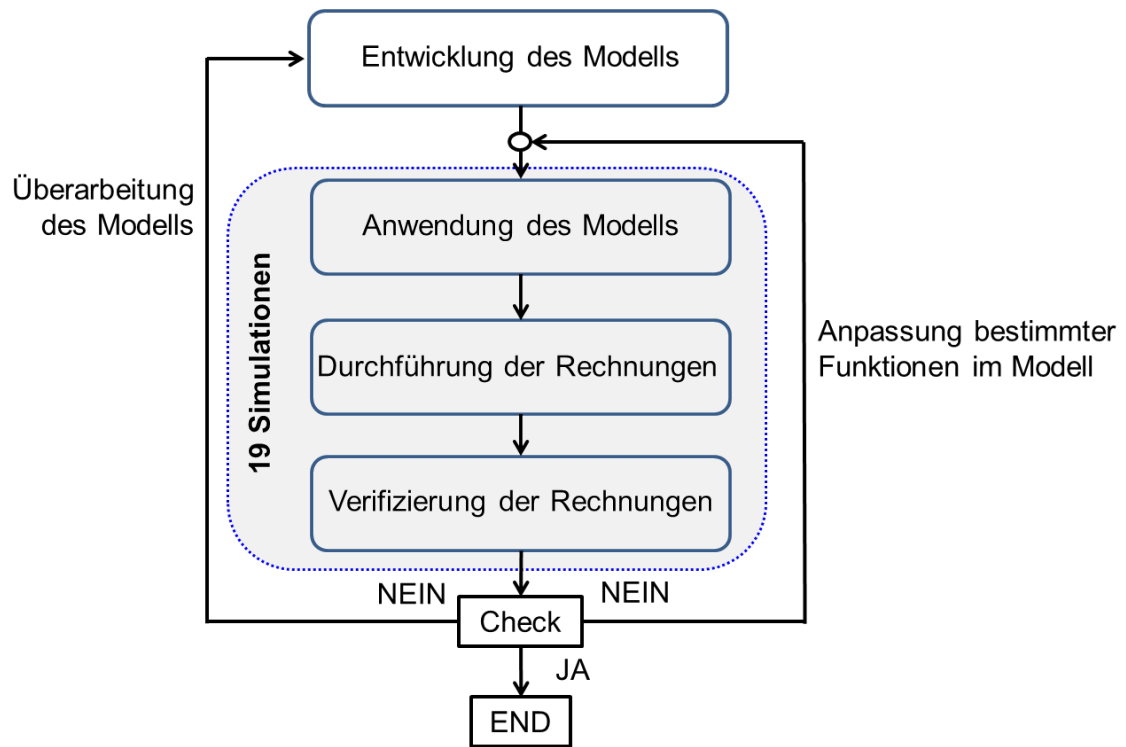


Abb. 2.1 Schematische Darstellung des entwickelten Verifizierungsverfahrens

Tab. 2.1 Entwickelte Ereignisliste für das Verifizierungsverfahren

Phase	Ereignisse	Ziel der Rechnung	Sicherheits- ebene
#1	Rechnung eines stationären Zustandes (Vollastbetrieb) für mindestens 3 Stunden	Überprüfung des Gleichgewichts der Energie- und Massenbilanzen zwischen Primär und Sekundärseite anhand der anlagenspezifischen thermohydraulischen Parameter.	-
#2	Abfahren der Anlage bis auf den Zustand „Unterkritisch kalt“	Verifizierung des dynamischen Verhaltens der Anlage anhand des stationären Teillastdiagramms und Prüfung der Funktionalität der Leistungsregelung und der betrieblichen Aufgabe der aktivierten Anlagensysteme (z. B. nukleares Nachkühl-system).	-
	Fehlöffnen eines DH-Sprühventils	Prüfung der Implementierung der KMD-Sollwertbegrenzung und der Funktionalität des Druckhaltersystems.	SE2 (D2-12)
	Fehlöffnen der HD-Reduzierstation bzw. Fehlschließen der GBA-Armatur	Prüfung der Implementierung der KMD- und KMM-Sollwertbegrenzung und der Funktionalität des Volumenregelsystems im Fall einer Massenbilanzstörung im Primärkreislauf. Prüfung der implementierten LOOP-RELEB-Grenzwerte und der Druckhalter-Abblaseregelung.	SE2 (D2-16/D2-14)
	Störung in der KMT-Regelung, die zu einem unkontrollierten Ausfahren von Steuerstäben führt	Prüfung des Anlageverhaltens infolge einer unkontrollierten Leistungszufuhr im Leistungsbetrieb (Reaktivitätsstörung). Verifizierung der Implementierung der L-RELEB-Grenzwerte.	SE2 (D2-21)
	Fehlerhafte Inbetriebnahme eines Strangs des Chemikalieneinspeisesystems, die zur Einspeisung von Deionat in PKL führt (externe Deborierung)	Prüfung des Anlagenverhaltens infolge einer Änderung der Reaktivität. Verifizierung der Implementierung der Stabfahrbegrenzung (STAFAB), Fahrgeschwindigkeitsbegrenzung (FAGEB) sowie der D-Bank-Stellungsregelung (D-BARE). Überprüfung der Steuerungsbefehle für die Betätigung der Komponenten in Chemikalieneinspeisesystem und Volumenregelsystem.	SE2 (D2-24)

Phase	Ereignisse	Ziel der Rechnung	Sicherheits- ebene
	Fehlöffnen eines FD-Sicherheitsventils	Prüfung des Anlagenverhaltens infolge einer Fehlfunktion im Frischdampf-System, die zu einer ungeplanten Temperatur-/Druckabsenkung im DE bzw. im PKL führt. Verifizierung der Frischdampfdruckregelung sowie der implementierten Funktionen für die Absperrung der betroffenen Dampferzeuger in Reaktorschutzsystem.	SE2 (D2-01)
	Lastabwurf auf Eigenbedarf	Prüfung des Anlagenverhaltens infolge einer schnellen Leistungsabsenkung. Verifizierung der Implementierung des Kriteriums für Lastabwurf (LAW) von der Stabeinwurffunktion STEW und der Korrektheit der Nachbildung der Dampferzeuger-Füllstandregelung (Vollast- und Schwachlastregelung). Prüfung der implementierten Umleitstationsregelung.	SE2 (D2-07)
	Ausfall aller in Betrieb befindlichen Hauptspeisewasserpumpen mit Zuschaltung der Reservepumpe	Prüfung des Anlagenverhaltens infolge eines vollständigen bzw. partiellen Ausfalls der Speisewasserversorgung. Verifizierung der Begrenzungseinrichtungen für die Beherrschung des Störfalls (SPEISE-RELEB und STEW) sowie der Implementierung sekundärseitiger RESA-Anregekriterien im Reaktorschutzsystem.	SE2 (D2-09)
#3	Ausfall der Hauptwärmesenke (TUSA ohne FDU) / Fehlöffnen aller FDU	Prüfung der Funktionalität der implementierten FD-Abblaseregelung nach Auslösung des Teilabfahrens. Verifizierung der korrekten Nachbildung der FD-Armaturenstation und der Ansprechwerte der FD-Sicherheitsventile.	SE2 (D2-06/D2-02)
	Ausfall einer Hauptkühlmittelpumpe (PUMA 1v4)	Prüfung des Anlageverhaltens beim Teilloop-Betrieb infolge eines Ausfalls einer Hauptkühlmittelpumpe (PUMA). Verifizierung der Implementierung des PUMA-RELEB Grenzwerts und der nachfolgenden STEW-PUMA-Funktion für die schnelle Reduktion der Reaktorleistung. Überprüfung des Störfallerkennungssignals aus MADTEB für die Aktivierung störfallspezifischer Fahrbereiche und Maßnahmen für die KMD- und KMM-Begrenzung.	SE2 (D2-10)

Phase	Ereignisse	Ziel der Rechnung	Sicherheits-ebene
	Notstromfall gleich oder kürzer als 10 Stunden	Prüfung des Anlageverhaltens infolge eines Ausfalls der Eigenbedarfsversorgung. Verifizierung des implementierten Modells für die Inbetriebnahme der Notstromversorgung durch Diesel-Start und Belastungsprogramm in Reaktorschutzsystem.	SE2 (D2-28)
	Versagen eines Dampferzeuger-Heizrohres (größer als betrieblich zulässige Leckagen und bis maximal 2F)	Verifizierung der implementierten Einsatzlogik des KMD- und KMM-Befehlsdiagramms „DE-Heizrohrleck“ für die Leistung- und Druckabsenkungsphase. Überprüfung des Zusammenspiels diverser betrieblicher Systeme und Sicherheitssysteme für die Beherrschung des Störfalles.	SE3 (D3-31)
	Mittleres Leck innerhalb des Sicherheitsbehälters (Leckquerschnitt $\leq 0,1F$)	Überprüfung der implementierten RESA-Anregekriterien und Notkühlkriterien im Reaktorschutzsystem für die Störfallerkennung. Prüfung der im Datensatz implementierten Prozesssignale für die Betrachtung der Übertragung von Energie und Masse aus der Primärseite im Sicherheitsbehälter. Verifizierung der Funktionalität der implementierten Komponenten des Not- und Nachkühlsystems. Prüfung der Einsatzlogik der KMD-Befehlsdiagramme „Kühlmittelverlust“.	SE3 (D3-23)
	Fehlöffnen und Offenbleiben eines Druckhalter-Sicherheitsventils	Prüfung der korrekten Nachbildung von DH-Sicherheitsventilen und des Abblasebehälters (ABB). Verifizierung des implementierten Modells für die ABB-Kühler. Prüfung der Auslösung der Notkühlkriterien	SE3 (D3-30)
	Leck in Frischdampfsystem innerhalb des Sicherheitsbehälters	Prüfung des Anlageverhaltens infolge eines Bruchs einer Frischdampfleitung hinter der Frischdampfabschlussarmatur (FD-AA). Verifizierung der Implementierung des Druckabfall-Kriteriums (DAF) und des Teilabfahren-Signals im Reaktorschutzsystem	SE3 (D3-05)
	Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung und mechanisches Verklemmen aller Steuerstäbe (ATWS)	Verifizierung des implementierten RESA-Kontrollsignals zur Erkennung von ATWS-Störfällen sowie der Einsatzlogik des KMD- und KMM-Befehlsdiagramms „ATWS“. Überprüfung des Zusammenspiels diverser betrieblicher Systeme und Sicherheitssysteme für die Beherrschung des Störfalles.	SE4a (D4a-04)

2.3 Prüfung der ausgewählten Ereignisse anhand der Ereignislisten unter Anwendung des Vorkonvoi-Analysesimulators

Zu den ausgewählten Ereignissen werden mit einem generischen Vorkonvoi-Analysesimulator mit Vorwärmkammern die Analysenergebnisse ermittelt. Hierzu wird einerseits auf bereits durchgeführte und beispielsweise im Störfallanalysenhandbuch dokumentierte Analysen zurückgegriffen. Andererseits wurden für bislang noch nicht betrachtete Ereignisse Analysen durchgeführt. Die erzielten bzw. herangezogenen Ergebnisse wurden der Bewertungsbasis schließlich gegenübergestellt und ausgewertet.

Im Folgenden werden zwei Rechnungen aus den Phasen 2 und 3 vorgestellt.

2.3.1 Rechnung der Phase 2

2.3.1.1 Ausfall aller in Betrieb befindlichen Hauptspeisewasserpumpen mit Zuschaltung der Reservepumpe

Die Nachrechnung dieses Ereignisses eignet sich für die Verifizierung der im Simulator implementierten Begrenzungsfunktionen (z. B. SPEISE-RELEB) sowie die im Datensatz implementierten Funktionen einzelner Komponenten (z. B. die Gruppen- und Untergruppensteuerung der Speisewasserpumpen). Gleichzeitig ermöglicht diese Simulation die Prüfung der simulierten thermodynamischen Wechselwirkung zwischen Primär- und Sekundärseite gemäß dem Anlagenverhalten unter dieser Störung.

Im Rahmen dieses Störfalls lassen sich die Implementierung und Nachbildung der Reaktorleistungsbegrenzungssignale (RELEB), die den Speisewasserdurchsatz und die Reaktorleistung überwachen, sowie die Ermittlung der erlaubten Reaktor- und Generatorleistung prüfen. Weiterhin können die automatischen Maßnahmen bzw. Regelungen beim Ansprechen verschiedener Begrenzungswerte getestet werden.

In der Analyse wurden die zwei in Betrieb befindlichen Hauptspeisewasserpumpen beim ungestörten Volllastbetrieb über Komponentenschutz (KS) abgeschaltet. Der Eintritt des Störfalls findet bei $t = 600$ s statt. Zur Auswertung der Simulationsergebnisse bzw. Verifizierung des Datensatzes wurden Informationen aus ähnlichen Rechnungen im Störfallhandbuch /GRS 14a/ sowie in den Schulungsunterlagen /KSG 14/ verwendet, die im Folgenden als Referenz bezeichnet werden.

Nach der Abschaltung der zwei Speisewasserpumpen startet die Reservepumpe innerhalb 9 s automatisch durch die Untergruppensteuerung zu, und gleichzeitig passt sich die Anlagenleistung an die reduzierte Speisewassermenge an. In der Begrenzungsfunktion SPEISE-RELEB wird überwacht, ob der Speisewasserdurchsatz zur gefahrenen Leistung passt. Ist dies nicht der Fall, werden automatische Maßnahmen zur Leistungsreduktion eingeleitet. Primärseitig wird durch Stabeinwurf die Leistung auf ca. 40 % reduziert und sekundärseitig wird durch Reduktion der Erlaubte-Generatorleistung (PERG) die Generatorleistung auf ca. 520 MW reduziert. Folgendes Anlagenverhalten ist zu erkennen: Aufgrund des fehlenden Speisewassers fallen die Dampferzeugerfüllstände und entsprechend steigt der Füllstand im Speisewasserbehälter an. Aufgrund der Leistungsreduktion steigt der FD-Druck und die FDU öffnet. Nach Ablauf der automatischen anpassenden Maßnahmen stabilisiert sich die Anlage im Teillast-Betrieb.

Die erste Durchführung dieser Transiente mit dem Vorkonvoi-Analysesimulator hat gezeigt, dass die Reservepumpe nicht wie in der Referenz beschrieben automatisch zugeschaltet wurde. Damit wurde die betriebliche Bespeisung der Dampferzeuger unterbrochen mit der darauffolgenden Absenkung der Dampferzeugerfüllstände. Die An- und Abfahrpumpen wurden nach Unterschreitung des DE-Füllstand-Grenzwertes von 9 m gestartet und übernahmen die Bespeisung der Dampferzeuger. Die Reaktor- und die Turbinenschnellabschaltung wurden durch das Signal „DE-Füllstand < min 1“ aus dem Reaktorschutzsystem ausgelöst. Das abnormale Anlageverhalten weist im Vergleich zur Referenz auf Korrekturbedarf bei der leittechnischen Nachbildung der Untergruppensteuerung (UGS) hin.

Aufgrund der Analyseergebnisse wurden entsprechende Anpassungen am Schritt 4 der UGS-Betriebsfunktionen für die Zuschaltung der Reservepumpe nach RL-Systembeschreibung durchgeführt. Die Simulation wurde mit dem korrigierten Datensatz wiederholt und die Ergebnisse und der Störfallauf stimmen mit den Referenzen überein. In der Abb. 2.2 bis Abb. 2.4 sind Beispiele der Simulationsergebnisse für die Reaktorleistung, Generatorleistung sowie den DE-Füllstand vor und nach den durchgeführten Anpassungen dargestellt. Die Ergebnisse nach den Anpassungen sind jeweils auf der rechten Seite der Abbildungen zu sehen.

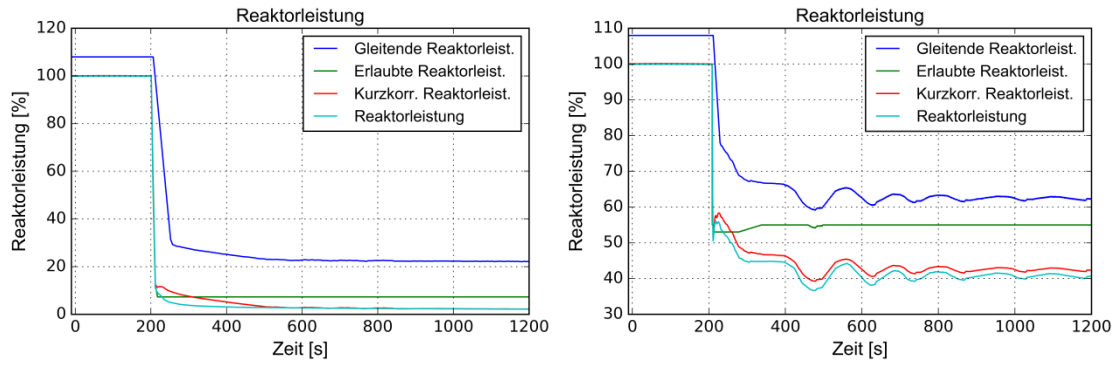


Abb. 2.2 Reaktorleistung vor (links) und nach (rechts) den Anpassungen

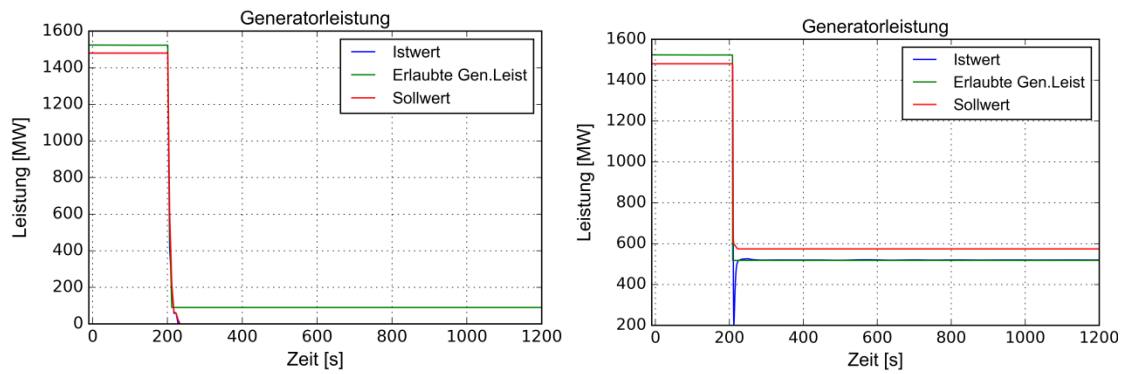


Abb. 2.3 Generatorleistung vor (links) und nach (rechts) den Anpassungen

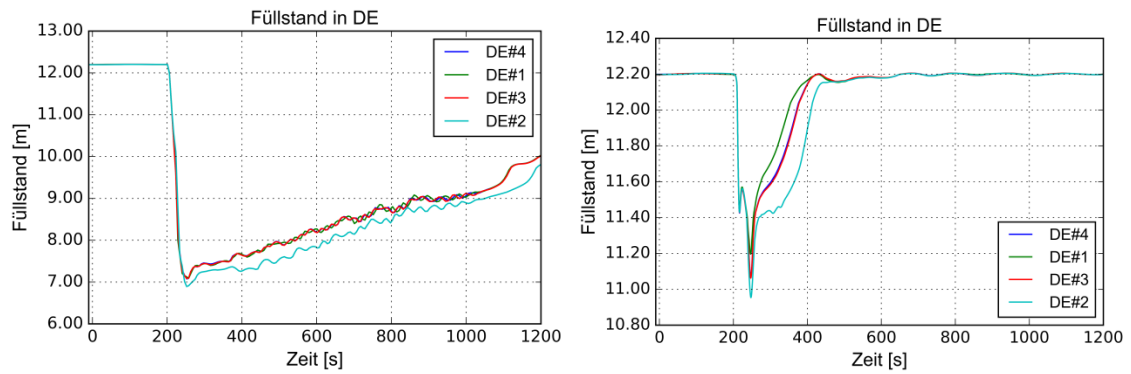


Abb. 2.4 DE-Füllstand vor (links) und nach (rechts) den Anpassungen

2.3.2 Rechnungen der Phase 3

2.3.2.1 Fehlöffnen und Offenbleiben eines Druckhaltersicherheitsventils

Die Durchführung dieser Simulation ist von Bedeutung für die Prüfung der richtigen Implementierung folgender Funktionen und Systeme:

- Notkühlkriterien in Reaktorschutzsystem;
- Bildung der Störfallerkennungssignale „Abf. 100 K/h“, „KMVÜ“ und „KMV-HD“;
- Einsatzlogik „Kühlmittelverluststörfall“ für die Durchführung der Maßnahmen anhand der KMV-Kennlinie aus MADTEB;

Dazu kann die korrekte thermohydraulische Nachbildung von DH-Sicherheitsventilen sowie die Modellierung der Leitungen zur Verbindung zwischen Druckhalter und Abblasebehälter geprüft werden. Die Verifizierung des implementierten Modells für die Simulation der Abblasebehälter-Kühler wird anhand dieser Simulation durchgeführt.

Der Verlauf der wesentlichen Anlageparameter wird anhand der Analyseergebnisse aus dem Bericht /ARE 06/ sowie aus dem Störfallanalysenhandbuch /GRS 14a/ verifiziert. Die Anfangs- und Randbedingungen für die Simulation wurden aus dem Bericht /ARE 06/ außer der Reaktorleistung abgeleitet. Die Reaktorleistung vor Störfallbeginn beträgt 103 %. Die Reaktorschnellabschaltung erfolgt vom zweiten RESA-Grenzwert. Gleichzeitig mit der Turbinenschnellabschaltung wird die Unverfügbarkeit der externen Stromversorgung angenommen. Durch Einzelfehler- und Instandhaltungspostulate stehen zwei Notstromdieselgeneratoren nicht zur Verfügung, so dass die Leckageergänzung mit zwei Sicherheitseinspeisepumpen, vier heißseitigen Druckspeichern und zwei Nachkühlpumpen erfolgt.

In Abb. 2.5 wird die Darstellung des Druckhalters und des DH-Abblasebehälters vorgestellt. Die Leitungen zwischen den oberen Teil des Druckhalters und des Abblasebehälters (Abblaseleitungen), in denen die zwei DH-Sicherheitsventile und das DH-Abblaseventil eingebaut sind, sind zusätzlich in der Abbildung dargestellt. Die alte Darstellung auf der linken Seite der Abb. 2.5 weist auf eine vereinfachte Modellierung der Abblaseleitungen. Das Modell wurde anhand der Daten aus der Isometrie in /KBR 84/ geprüft und verbessert. Die Geometrie sowie die geodätische Höhe der Leitungen wurden im Datensatz entsprechend angepasst und sind auf der rechten Seite der Abb. 2.5 dargestellt.

Der Querschnitt der DH-Sicherheitsventile und des DH-Abblaseventils sowie das Volumen des Abblasetanks wurden anhand der Anlagebeschreibung /KBR 06/ geprüft. Die Prüfung des Kühlkreislaufs des Abblasebehälters wird auch anhand dieser Rechnung durchgeführt. Der Kühlkreislauf besteht aus Umwälzpumpe, Kühler und den verbindenden Rohrleitungen. Die Entnahmestelle befindet sich am tiefsten Punkt des Abblasebehälters, die Einspeisestelle am zylindrischen Teil des Abblasebehälters. Der Kühler ist ein liegender U-Rohrbündelwärmetauscher und besteht primärseitig aus einem Schmiedeteil mit einem im Rohrboden eingeschweißten U-Rohrbündel und sekundärseitig aus einem zylindrischen Mantel mit vorgeschweißtem Korbboden. Die Daten für die Prüfung des implementierten Modells im Datensatz wurden aus /KBR 06/ abgeleitet. Das GCSM-Model „HEATEX“ wurde für die Rechnung der heißseitigen sowie kaltseitigen Austrittstemperatur des Kühlers benutzt und die entsprechend Eingabeparameter wurden anhand der Daten aus /KBR 06/ geprüft.

Für einen KMV-Störfall werden abhängig von den drei Variablen KM-Druck, DH-Füllstand und Δp (Differenzdruck der Anlagen- /Betriebsräumen im Sicherheitsbehälter gegen Atmosphäre) unterschiedliche Reaktorschutzkriterien wirksam, von denen die folgenden wesentlichen Maßnahmen abgeleitet werden:

- *RESA* bei $\Delta p > 30$ mbar
- *Abfahren mit 100 K/h* bei $KMD < 131$ bar und $\Delta p > 30$ mbar
- *HD-Notkühlkriterien*, wenn 2 der folgenden 3 Bedingungen erfüllt sind:
 - $KMD < 110$ bar
 - $\Delta p > 30$ mbar
 - $DHF < 2,28$ m

Mit Anregung des Signals „Abfahren mit 100 K/h“ im Reaktorschutzsystem wird in der MADTEB das Störfallerkennungssignal „Abf. 100 K/h“ gespeichert. Hierdurch werden in der MADTEB alle notwendigen Änderungen in den KMD- und KMM-Befehlsdiagrammen sowie der hiervon unabhängigen Maßnahmen für die Phase nach Anregung des 100 K/h-Abfahrens bis zum Erreichen der 2 v 3 HD-Notkühlkriterien eingeleitet. Mit Erreichen der 2 v 3 HD-Notkühlkriterien im Reaktorschutzsystem werden einerseits Maßnahmen ausgelöst, die bei noch anstehenden HD-Notkühlkriterien „nicht überbrückbar“ und andererseits bei wieder angehobenem DHF ($> 2,28$ m) „überbrückbar“ sind.

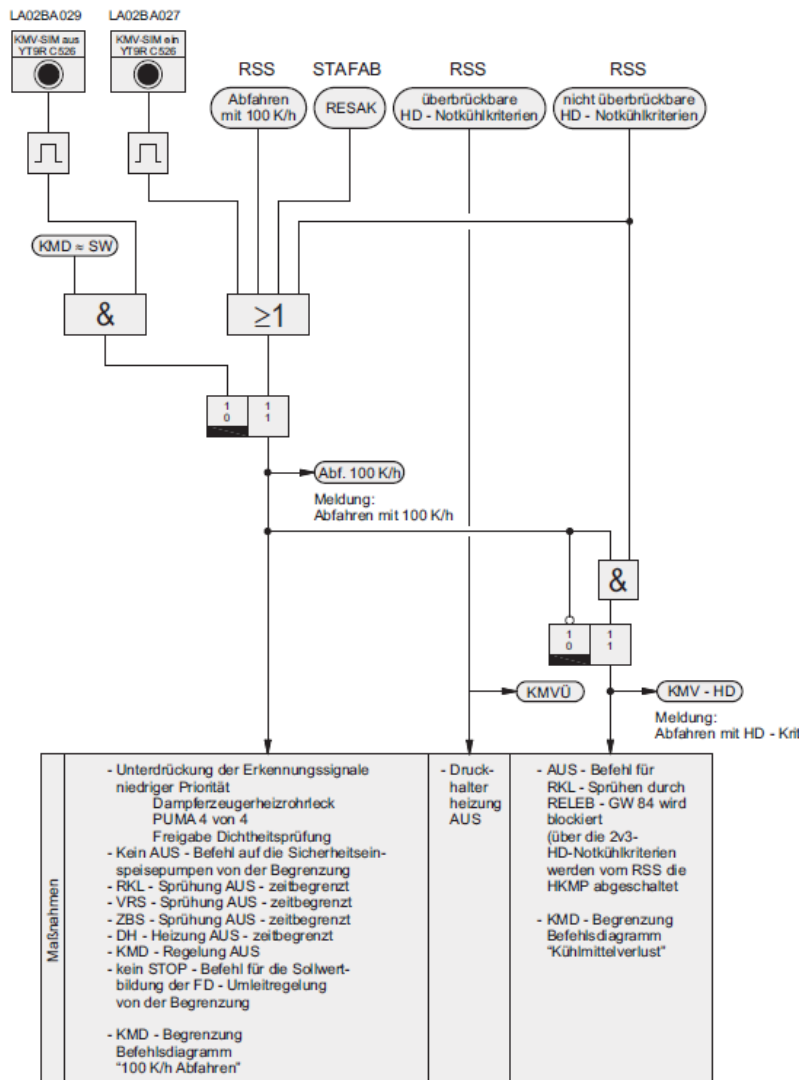


Abb. 2.6 Einsatzlogik der KMD-Befehlsdiagramme „KMV“ und „100 K/h Abfahren“ /KSG 14/

In Abb. 2.7 bis Abb. 2.15 sind die Ergebnisse der Rechnung dargestellt. Mit dem fehlerhaften Öffnen des Druckhaltersicherheitsventils fällt der Kühlmitteldruck innerhalb von wenigen Sekunden auf den Sättigungsdruck zur primärseitigen Maximaltemperatur (ca. 122 bar) ab. Danach wird der weitere Druckabfall durch Dampfbildung reduziert. Die Reaktorschnellabschaltung wird nach angenommenen Randbedingungen nicht durch das Erreichen des Grenzwerts „KMD < 131 bar und $P_{th} > 12\%$ “ ausgelöst, sondern durch das Kriterium „ $\Delta p > 30\text{ mbar}$ “. Die Ergebnisse der durchgeführten Simulation sind mit denen aus dem Störfallanalysenhandbuch vergleichbar. Stattdessen führte das Erreichen des Grenzwertes „Druckhalterfüllstand > 9,5 m“ in der Simulation aus /ARE 06/ zu der Auslösung des RESA-Signals nach 95 s mit Störfallbeginn.

Diese Abweichung zu dem Ergebnis aus der GRS-Rechnung wurde von einem unterschiedlichen Verlauf des Drucks im DH-Abblasebehälter verursacht. In /ARE 06/ betrug die Zeit bis zum Erreichen des Ansprechdrucks der Berstscheiben im Abblasetank von 15 bar ca. 138 s. Im Gegensatz dazu steigt der Druck im Abblasebehälter in der GRS-Rechnung auf 15 bar in ca. 60 s. Das frühere Erreichen des „ $\Delta p > 30 \text{ mbar}$ “-Kriteriums verursacht eine frühere Auslösung des Sekundärseitigen 100 K/h-Abfahrens sowie des HD-Notkühlkriteriums in der GRS-Rechnung.

Durch die gleichzeitige Turbinenschnellabschaltung und die Annahme des Notstromfalls steigt der Frischdampfdruck an. Aufgrund der Annahme des Notstromfalls fallen die Hauptkühlmittelpumpen aus, sodass im weiteren Störfallablauf der Wärmetransport aus dem Reaktorkern zu den Dampferzeugern im Naturumlauf erfolgt. Dazu wird die Anlage sekundärseitig durch das Öffnen der vier FD-Abblaseregelventile abgefahren.

Durch das Druckhaltersicherheitsventil strömen anfänglich ca. 70 kg/s Dampf in den Abblasetank. Durch den mit der Dampfausströmung verbundenen Abfall des Kühlmitteldrucks bis auf den Sättigungsdruck der heißen Kühlmitteltemperatur, beginnt das Kühlmittel im Deckelraum des Reaktordruckbehälters auszudampfen. Das Kühlmittel wird in den Druckhalter geschoben, so dass der anfänglich von 7,3 m auf 5,8 m abgefallene Druckhalterfüllstand bis auf die oberste Messstelle von 11,45 m ansteigt. Ein Gemisch aus Wasser und Dampf strömt durch das Sicherheitsventil (volumetrischer Dampfgehalt 40 bis 75 %), wodurch die Leckrate bis auf 80 kg/s ansteigt.

Durch den anfänglichen raschen Abfall des Kühlmitteldrucks auf den Sättigungsdruck zur heißen Kühlmitteltemperatur entleert sich der Deckelraum des Reaktordruckbehälters und der Füllstand (collapsed level) im oberen Plenum fällt bis Mitte der Hauptkühlmittelleitung ab. Der Reaktorkern bleibt jedoch auch bei diesem Füllstand ausreichend mit einem Gemisch aus Wasser und Dampf bedeckt.

Nach Erreichen der Notkühlkriterien beginnen die zwei von vier verfügbaren Sicherheitseinspeisepumpen das Kühlmittel aus den Flutbecken in den Primärkreislauf einzuspeisen. Bei ca. 500 s übersteigt die Einspeiserate die zweiphasige Leckrate. Ab ca. 1600 s steigt der Füllstand im Reaktordruckbehälter wieder langsam an.

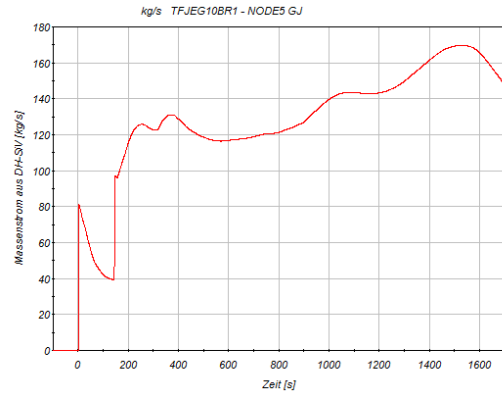
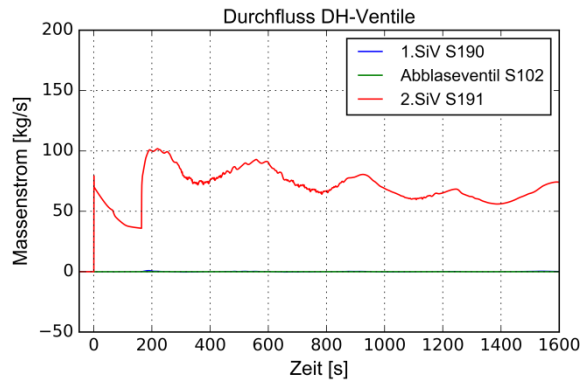


Abb. 2.7 Leckstrom aus DH-SiV (rechte Grafik aus /GRS 14a/)

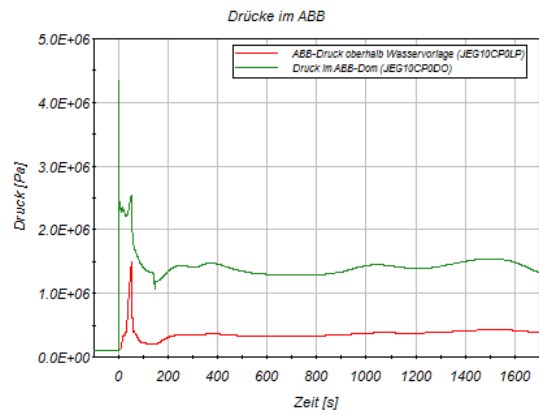
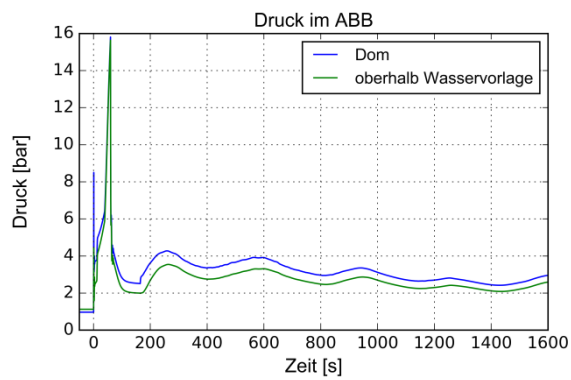


Abb. 2.8 Druck im DH-Abblasebehälter (rechte Grafik aus /GRS 14a/)

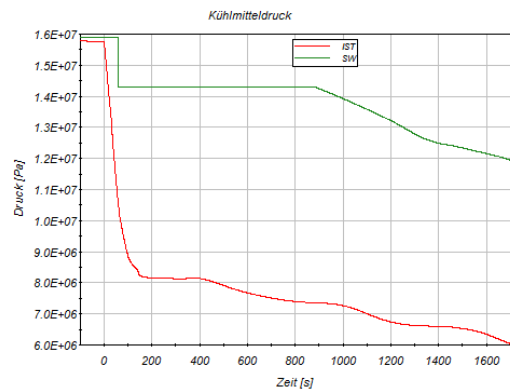
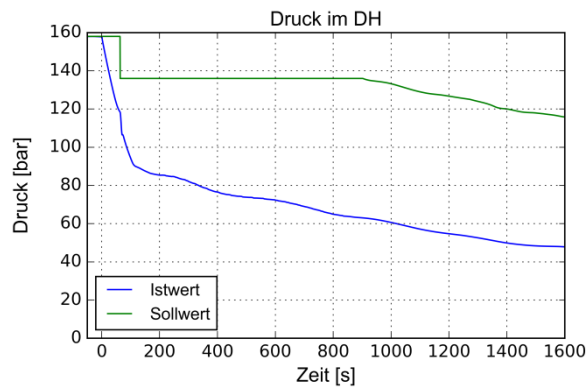


Abb. 2.9 Druck im Druckhalter (rechte Grafik aus /GRS 14a/)

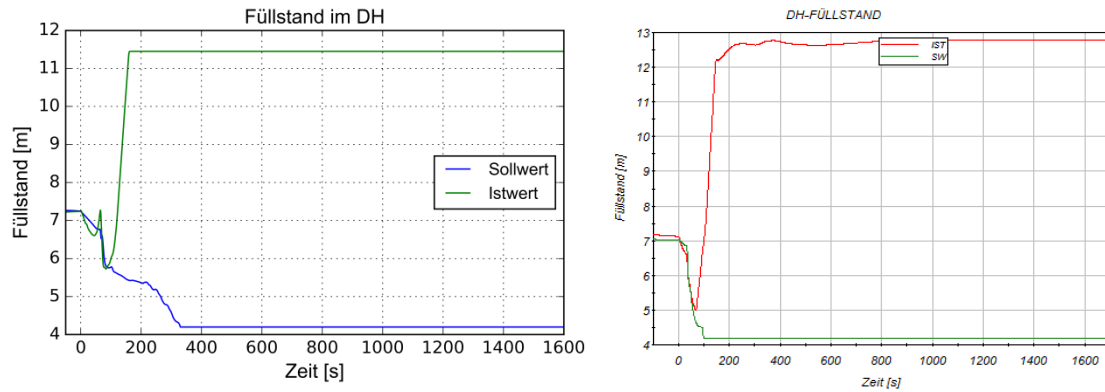


Abb. 2.10 Druckhalter-Füllstand (rechte Grafik aus /GRS 14a/)

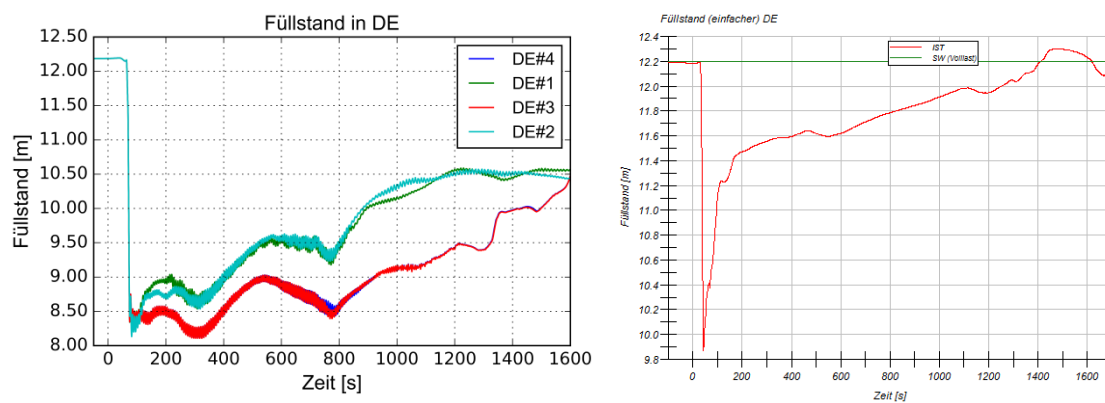


Abb. 2.11 Dampferzeuger-Füllstand (rechte Grafik aus /GRS 14a/)

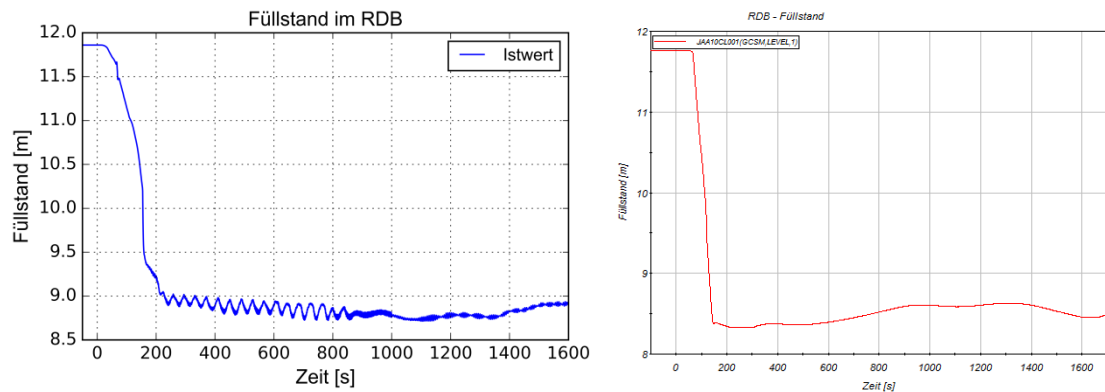


Abb. 2.12 Kollabierter Füllstand im RDB (rechte Grafik aus /GRS 14a/)

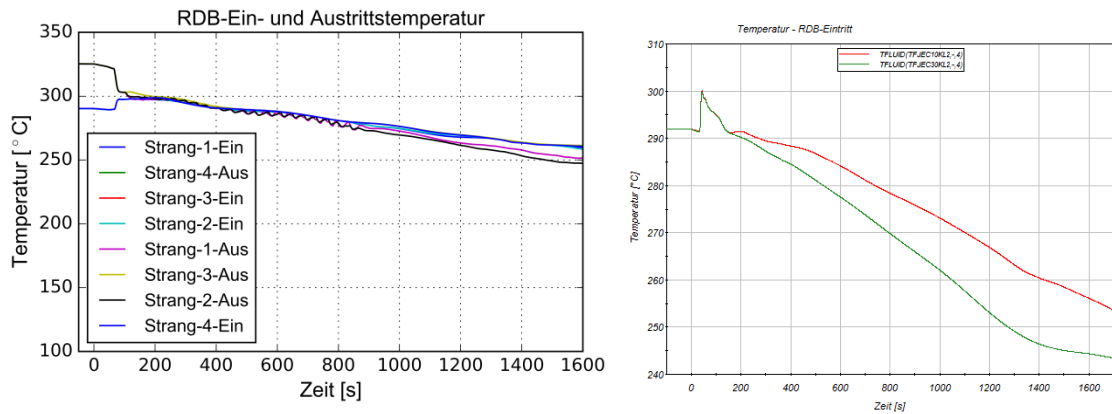


Abb. 2.13 Reaktor- Eintritts- und Austrittstemperatur (rechte Grafik aus /GRS 14a/
nur RDB-Eintrittstemperatur gezeigt)

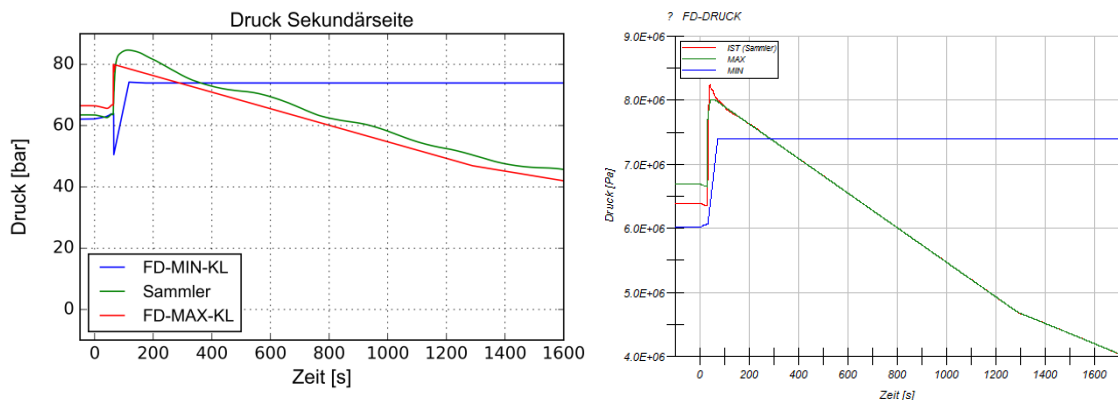


Abb. 2.14 Druck auf der Sekundärseite (rechte Grafik aus /GRS 14a/)

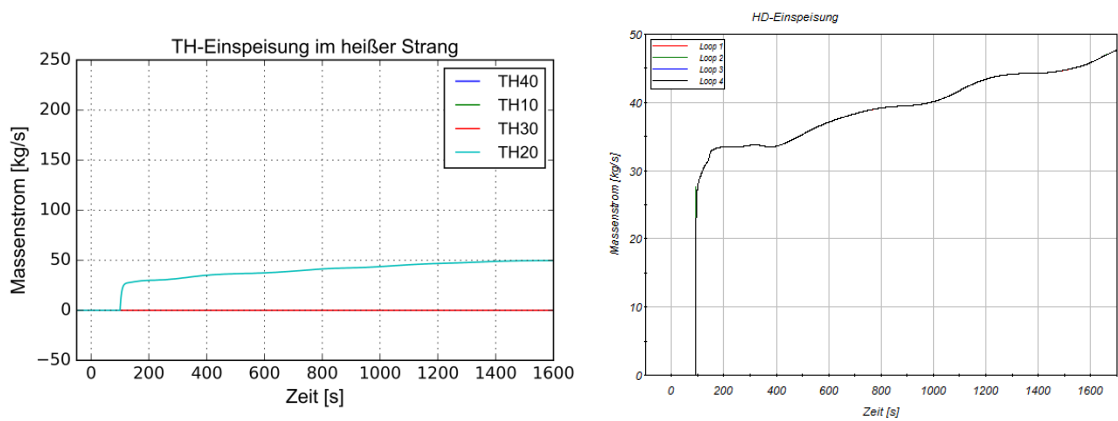


Abb. 2.15 Heißseitige Einspeisung im Primärkreislauf aus dem Not- und Nachkühl-
system (rechte Grafik aus /GRS 14a/)

3 Ansätze zur Weiterentwicklung für ein automatisiertes Verfahren

Das im Rahmen des Vorhabens entwickelten Verifizierungsverfahren ermöglicht die Einhaltung eines hohen Qualitätsstandards der Datensätze und, falls erforderlich, eine Verbesserung der im Datensatz des Analysesimulators implementierten betrieblichen und sicherheitstechnischen Systeme bzw. Komponenten. Die wesentlichen Funktionen der Systeme, die für die Beherrschung von Transienten oder Störfällen von Bedeutung sind, werden vom entwickelten Verfahren abdeckend geprüft. Eine Erweiterung der Ereignisliste durch die Erhöhung der Anzahl von Simulationen ist im Weiteren erforderlich, um die Effizienz des Verfahrens bei der Entdeckung von Fehlern in Datensätzen zu erhöhen. Eine Erweiterung der Ereignisliste würde aber auch zu einer Erhöhung des Analyseaufwands führen. Dazu steigt aufgrund der stetigen Anpassungen an den Datensätzen der Analysesimulatoren für die Implementierung neuer Funktionen bzw. für die Verfeinerung oder Neu-Modellierung einzelner Komponenten die Wahrscheinlichkeit des Fehlereintritts.

Die Folge einer solchen Vorgehensweise ist die mögliche Abweichung des Anlagenverhaltens bei der Rechnung eines spezifischen Ereignisses mit dem anlagenspezifischen Analysesimulator von den im Laufe des Verifizierungsverfahrens berechneten Simulationsergebnissen. Damit ergibt sich der Verlust von Aussagesicherheit bei der Bewertung des Anlagenverhaltens. Eine Automatisierung des Verifizierungsverfahrens stellt eine mögliche Lösung dieser Problematik dar. Mit Hilfe einer aus der Softwareentwicklung abgeleiteten Methode der Kontinuierlichen Integration (engl.: continuous integration) wird der Eingabedatensatz des anlagenspezifischen Analysesimulators automatisch aus dem SVN-Repository regelmäßig neu erzeugt. Die im Verifizierungsverfahren festgelegten Simulationen werden mit einer festzulegenden Zeitspanne automatisch durchgeführt und die Ergebnisse werden anhand der Simulationsergebnisse aus der Bewertungsbasis verglichen. Ziel des ganzen Verfahrens ist es, möglichst frühzeitig durch Änderungen am Datensatz neu eingebaute Fehler zu finden.

Die Anwendung eines automatisierten Verifizierungsverfahrens ermöglicht die zeitnahe Identifizierung von im Laufe der Weiterentwicklung des Analysesimulators möglicherweise eingebauten Fehlern. Auf diese Weise trägt das Verifizierungsverfahren zu einer hohen Qualität des Datensatzes bei.

Durch die Implementierung und Verwendung eines Meldungsgenerators wird sichergestellt, dass künftig beim Eintreten von Fehlern in einzelnen Teilen des Analysesimulordatensatzes eine schnelle Anpassung und Wiederherstellung der ursprünglichen Bedingungen vorgenommen wird.

Die in Abb. 3.1 eingefügte schematische Darstellung zeigt die Anwendung des Verifizierungsverfahrens bei einer Automatisierung der Durchführung von Rechnungen. Die Randbedingungen bzw. die simulationsspezifischen Maßnahmen zur Durchführung der Rechnungen aus der Simulationsmatrix werden protokolliert und in einem File gespeichert. Eine noch zu entwickelnde Schnittstelle würde die in der Ereignisliste befindlichen Simulationen parallel auf einem Rechencluster starten. Eine automatisierte Verifizierung erfolgt pro Ereignis auf Basis der Definition einer Bandbreite für die wesentlichen simulationsspezifischen Anlagenparameter. Durch die Anwendung eines noch zu entwickelnden Meldungsgenerators für die Post-Processing Phase würden relevante Abweichungen des Verlaufs der wesentlichen simulationsspezifischen Anlagenparameter gemeldet werden, um den Anwendern Hinweise für die Verbesserung eines spezifischen Modells zu liefern. Ein Beispiel der Anwendung der automatisierten Verifizierung ist in Abb. 3.2 gezeigt, in der die maximale Hüllrohrtemperatur am heißen Stab nach dem Eintritt eines doppelendigen Bruchs im Primärkreis (blaue Kurve) zusammen mit der vom Anwender definierten Bandbreite und dem erwarteten Verlauf (grüne Kurve) geplottet ist. Bei der Verletzung der parameterspezifischen Grenze würde eine Meldung automatisch generiert.

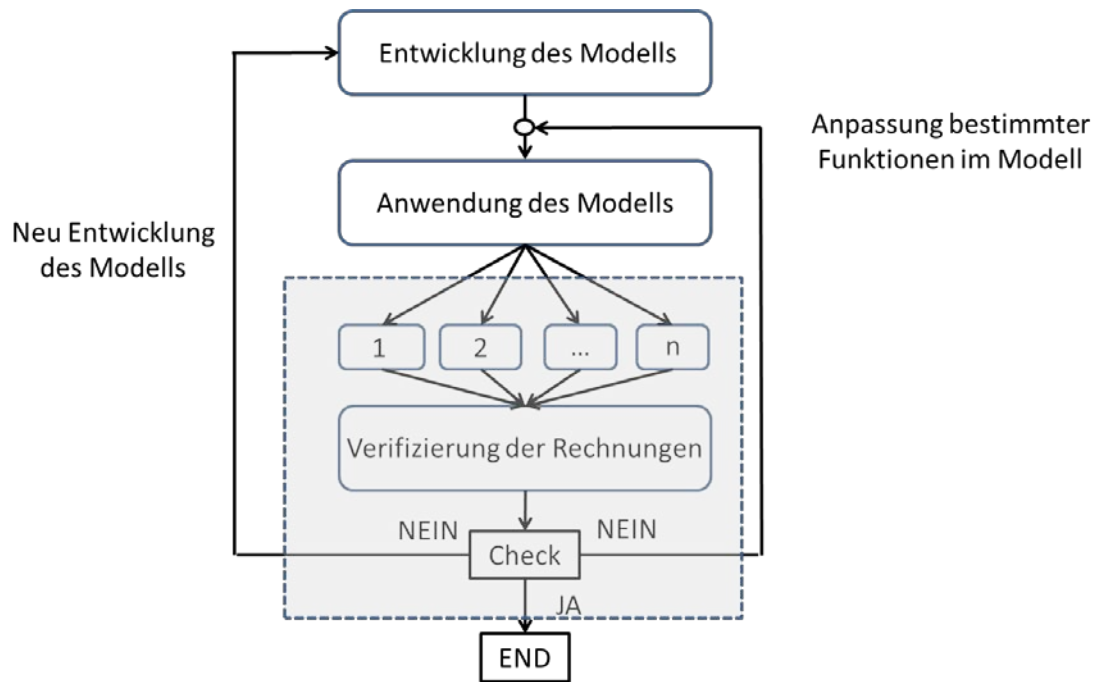


Abb. 3.1 Schematische Darstellung des automatisierten Verifizierungsverfahrens

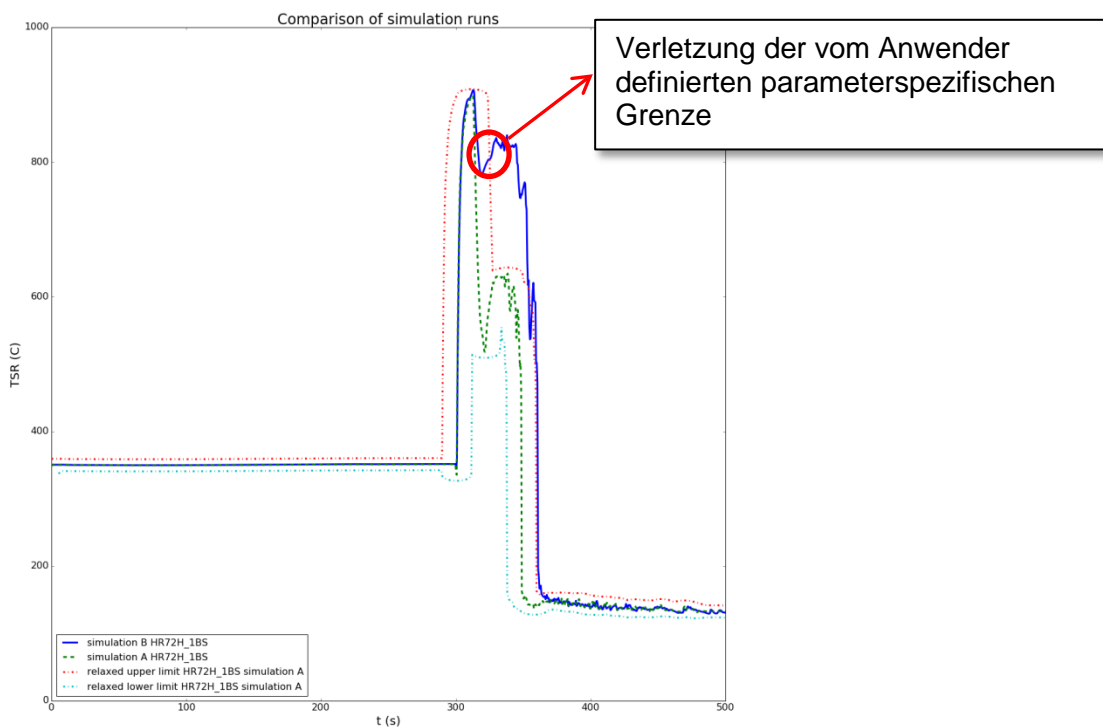


Abb. 3.2 Beispiel der Anwendung des vorgeschlagenen automatisierten Verifizierungsverfahrens

4 Zusammenfassung

Das wesentliche Ziel des Eigenforschungsvorhabens war die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Definition eines Mindestsatzes an Ereignisanalysen, auf dessen Grundlage eine weitestgehend abdeckende Verifikation eines anlagenspezifischen Analysesimulators durchgeführt werden konnte.

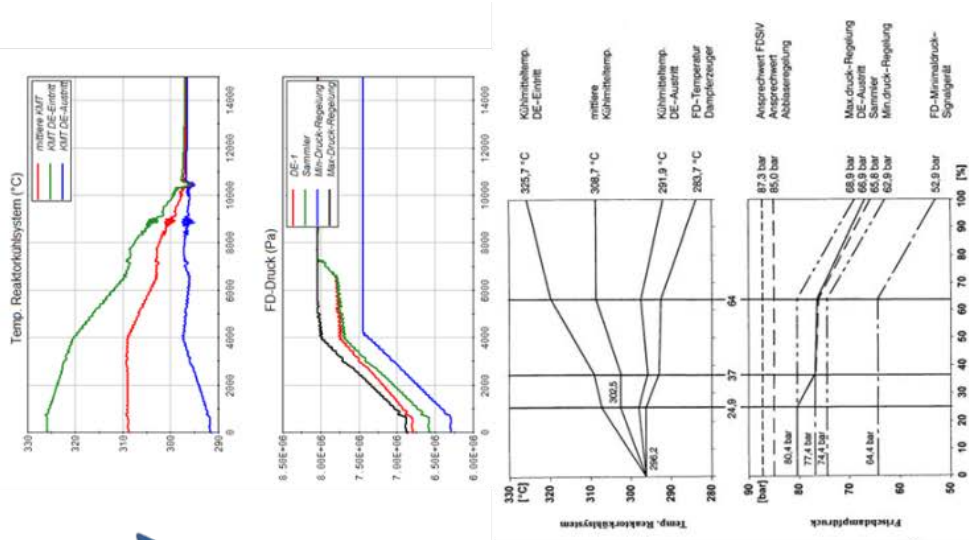
Für die Entwicklung eines Verifizierungsverfahrens war es notwendig, die Arbeiten in verschiedenen Arbeitsschritten wie folgt durchzuführen:

Zunächst wurde eine Aufbereitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik durchgeführt. Das Ergebnis der Recherche hat gezeigt, dass nur Prozeduren für eine Validierung der Datensätze vorgeschlagen werden mit dem Ziel die Qualitätssicherung des Datensatzes zu gewährleisten. Die Validierung erfolgte im Wesentlichen anhand von Nachrechnungen experimenteller Versuche und von in Anlagen abgelaufenen Ereignissen für die Anlagenmessdaten zur Verfügung gestellt wurden. Die Anzahl der durchgeführten Ereignisse ist jedoch nicht ausreichend für die Funktionalitätsprüfung der betrieblichen und sicherheitstechnischen Systeme in Analysesimulatoren. Eine abdeckende Verifizierung der Eingabedatensätze ist allerdings für die Analysesimulatoren erforderlich, um die korrekte Funktion aller Systeme der Analysesimulatoren sicherzustellen.

Aus diesem Grund wurde eine Liste von Ereignissen erstellt, auf deren Basis das Verifizierungsverfahren durchzuführen ist. Die richtige Auswahl der Ereignisse aus der Ereignisliste stellte die wesentliche Grundlage für die erfolgreiche Methodenentwicklung im vorliegenden Projektvorhaben dar. Aufgrund des hohen Komplexitätsgrads des Eingabedatensatzes wurde das Verfahren im Wesentlichen in drei Schritte eingeteilt, mit dem Ziel, die unterschiedlichen Teile des Datensatzes bzw. die einzelnen Systeme des Analysesimulators schrittweise in einem höheren Untersuchungsgrad zu analysieren und zu verifizieren. Die Liste von Ereignissen für das Verifizierungsverfahren ist in Tab. 2.1 definiert. In Anlehnung an diese Liste werden insgesamt 19 Simulationen für das Verifizierungsverfahren durchgeführt. Nach der Durchführung jeder Rechnung erfolgte die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Daten aus der Bewertungsbasis.

Anpassungen von thermohydraulischen bzw. leittechnischen Modellen für den ausgewählten Analysesimulator wurden bei der Feststellung von Abweichungen zwischen den berechneten und den aus der Bewertungsbasis herausgezogenen Ergebnissen vorgenommen. In einem Fall war für den weiteren Einsatz eines Bausteins eine Neuprogrammierung des digitalen Reglers (Funktionsbauteile TELEPERM®) im ATHLET Code notwendig. Der vorher erwähnte Arbeitsschritt erfolgte im Rahmen des Vorhabens 3614R01306 unter AP 6.1.8 „Erstellung von digitalen Leittechnik-Kontrollern in FORTRAN für Analysesimulatoren“ (siehe /GRS 17/).

Für die Durchführung der ausgewählten Rechnungen wurde eine spezielle Funktion des Simulator-Tools ATLAS benutzt, die eine Protokollierung der für die Initiierung der Transienten oder Störfälle notwendigen Maßnahmen ermöglicht. Das Verfahren wird anhand der Schemas in Abb. 4.1 vorgestellt. In diesem Beispiel werden simulationspezifische Maßnahmen (z. B. aus dem dementsprechenden Betriebshandbuch (BHB)) in einer Datei (sog. „Trigger“-Datei) protokolliert und sind im Analysesimulator wiederwendbar.



TRIGGER				
Nr.	Keys	Name	Limit	Delay
1	GENERAL..	MODEL..T	> 601	0,000
2	CCM..SA-SE-489..	MODEL..SRELCP54F	< 400000..	0,000
3	CCM..RS-48F..	MODEL..JTK00F0306	< 40,0	0,000
4	CCM..RL..	MODEL..C48L43001	< 400,0	0,000
5	CCM..RL..	MODEL..C48L43001	< 400,0	0,000

ACTIONS				
Nr.	Keys	Name	Logic	FF.TYP
1	CCM..SA-SE-489..	MODEL..SRELCP54F	1	input
2	CCM..SA-SE-489..	MODEL..SRELCP54F	1	input
3	CCM..SA-SE-489..	MODEL..SRELCP54F	1	Up
4	CCM..SA-SE-489..	MODEL..SRELCP54F	1	Up
5	CCM..RL..	MODEL..C48L43001	2	Up

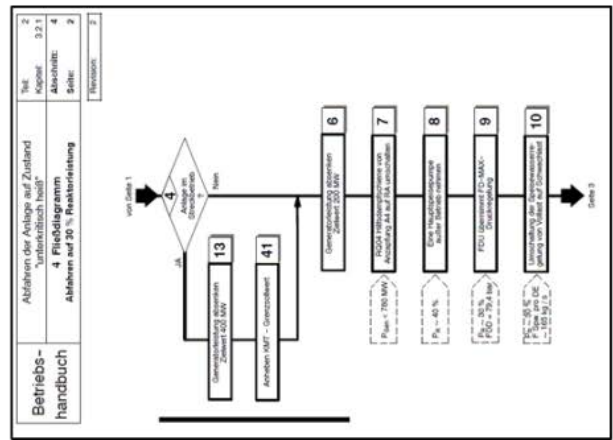


Abb. 4.1 Bsp. Protokollierung Maßnahmen für Initiierung / Durchführung der Rechnung „Abfahren der Anlage bis auf den Zustand „Unterkritisch kalt“

Die Identifizierung des Weiterentwicklungsbedarfs ist für die Erweiterung von Modellen in den anlagenspezifischen Datensätzen für die Analyse von Phänomenen von Bedeutung, die während des normalen Betriebs bzw. im Fall von Transienten oder Störfällen in einem KKW auftreten können.

Die Anwendung des Verifizierungsverfahrens hat die Identifizierung von Weiterentwicklungsbedarf von existierenden Modellen und/oder die Implementierung von neuen Modellen/Systemen ermöglicht. Die im Folgenden aufgelisteten Punkte stellen die Beiträge des Verifizierungsverfahrens dar, die im neuen laufenden Vorhaben 4717R01334 berücksichtigt sind:

- Verbesserung des Kondensatormodells
- Nachbildung der Begrenzung der Leistungsdichte (PEAK-RELEB)
- Optimierung einzelner Thermofluid-Objekte (z. B. Verfeinerung der Nodalisierung der Kühlmittelleitungen) für eine detailliertere Betrachtung von physikalischen Phänomenen (u. a. Dampf-Kondensat-Gegenströmung)

Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Verifizierungsverfahren ermöglicht die Einhaltung eines hohen Qualitätsstandards der Datensätze und, falls erforderlich, eine Verbesserung der im Datensatz des Analysesimulators implementierten betrieblichen und sicherheitstechnischen Systeme bzw. Komponenten. Eine Erweiterung der Ereignisliste durch die Erhöhung der Anzahl von Simulationen ist im Weiteren erforderlich, um die Effizienz des Verfahrens bei der Entdeckung von Fehlern in den Datensätzen zu erhöhen.

Um eine Erhöhung des Analyseaufwands durch die Erweiterung der Ereignisliste zu vermeiden, wurde eine Automatisierung des Verifizierungsverfahrens vorgeschlagen. Mit Hilfe einer aus der Softwareentwicklung abgeleiteten Methode der kontinuierlichen Integration (engl.: continuous integration) wird der Eingabedatensatz des anlagenspezifischen Analysesimulators automatisch aus dem SVN-Repository regelmäßig neu erzeugt. Die im Verifizierungsverfahren festgelegten Simulationen werden mit einer festzulegenden Zeitspanne automatisch durchgeführt und die Ergebnisse werden anhand der Simulationsergebnisse aus der Bewertungsbasis verglichen. Ziel des Verfahrens ist es, möglichst frühzeitig durch Änderungen am Datensatz neu eingebaute Fehler zu finden.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung des entwickelten Verifizierungsverfahrens	11
Abb. 2.2	Reaktorleistung vor (links) und nach (rechts) den Anpassungen.....	17
Abb. 2.3	Generatorleistung vor (links) und nach (rechts) den Anpassungen	17
Abb. 2.4	DE-Füllstand vor (links) und nach (rechts) den Anpassungen.....	17
Abb. 2.5	Entwicklung der Modellierung der Abblaseleitungen für die Verbindung des Druckhalters mit dem DH-Abblasetank (links: altes Modell, rechts: neue Modellierung)	20
Abb. 2.6	Einsatzlogik der KMD-Befehlsdiagramme „KMV“ und „100 K/h Abfahren“ /KSG 14/	21
Abb. 2.7	Leckstrom aus DH-SiV (rechte Grafik aus /GRS 14a/).....	23
Abb. 2.8	Druck im DH-Abblasebehälter (rechte Grafik aus /GRS 14a/).....	23
Abb. 2.9	Druck im Druckhalter (rechte Grafik aus /GRS 14a/).....	23
Abb. 2.10	Druckhalter-Füllstand (rechte Grafik aus /GRS 14a/).....	24
Abb. 2.11	Dampferzeuger-Füllstand (rechte Grafik aus /GRS 14a/).....	24
Abb. 2.12	Kollabierter Füllstand im RDB (rechte Grafik aus /GRS 14a/)	24
Abb. 2.13	Reaktor- Eintritts- und Austrittstemperatur (rechte Grafik aus /GRS 14a/ nur RDB-Eintrittstemperatur gezeigt).....	25
Abb. 2.14	Druck auf der Sekundärseite (rechte Grafik aus /GRS 14a/).....	25
Abb. 2.15	Heißseitige Einspeisung im Primärkreislauf aus dem Not- und Nachkühlsystem (rechte Grafik aus /GRS 14a/).....	25
Abb. 3.1	Schematische Darstellung des automatisierten Verifizierungsverfahrens	29
Abb. 3.2	Beispiel der Anwendung des vorgeschlagenen automatisierten Verifizierungsverfahrens	29
Abb. 4.1	Bsp. Protokollierung Maßnahmen für Initiierung / Durchführung der Rechnung „Abfahren der Anlage bis auf den Zustand „Unterkritisch kalt“	33

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Entwickelte Ereignisliste für das Verifizierungsverfahren	12
----------	---	----

Literaturverzeichnis

- /ARE 06/ AREVA Bericht, „KBR: Fehlerhaftes Öffnen und Offenbleiben des Druckhaltersicherheitsventils“, Doc. ID. NGPS1/2004/de/0638 Rev. A, Erlangen, 11/07/2006.
- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an KKW in der Fassung der Bekanntmachung vom 03.03.2015.
- /GRS 17/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Ermittlung des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Durchführung und Bewertung von Störfallanalysen und der Verwendung von Analysesimulatoren, F&E-Vorhaben 3614R01306, GRS – 462, ISBN 978-3-946607-45-8, März 2017.
- /IAE 09/ Deterministic safety analysis for nuclear power plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-2, IAEA Wien 2009.
- /KBR 84/ KWU-Bauleitung KBR, Isometrie der Leitungen YP10Z030/Z031/Z32, KWU-R-231, 9. August 1984.
- /KBR 06/ SÜ 2006 Kernkraftwerk Brokdorf (KBR) – Anlagebeschreibung, Stand 10/2006A.
- /GRS 11/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Schaffung eines Handbuchs für Störfallanalysen deutscher Kernkraftwerke, F&E-Vorhaben 3609R01335, Auftrags-Nr.: 800090, GRS-A-3632, September 2011.
- /GRS 14a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Weiterentwicklung eines Handbuchs für Störfallanalysen deutscher Kernkraftwerke, Auftrags-Nr.: 800091, GRS-A-3764, September 2014.

- /GRS 15/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Untersuchung von Betriebserfahrungen aus Kernreaktoren – Generische Untersuchung der Erkenntnisse und Schlussfolgerungen und Fachberatung zu speziellen Themen, Zwischenbericht BMUB Projekt Nr. 3615R01321, Auftrags-Nr. 820450, GRS-A-3859, Juni 2015.
- /KFD 12/ Kund M. et al., Enhanced Technical Support to the Nuclear Regulatory Authority of the Netherlands represented by EL&I in the Field of Nuclear Safety for new Nuclear Facilities, Project-No. 333101 KFD, 19/04/2012.
- /KSG 14/ KSG/GfS,
Allgemeine Grundlage und Einführung in die Gesamtanlage,
S28301RH.DOCX/0/06.08.2014/DR.
- /PET 08/ Petruzzi A. and F. D'Auria, Thermal-Hydraulic system codes in nuclear reactor safety and qualification procedures, Science and Technology of Nuclear Installation, Article ID 460795, doi:10.1155/2008/460795, Volume 2008.
- /SIA 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Bekanntmachung der „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“, http://regelwerk.grs.de/de/sianf_an_kkw, 22.11.2012.

Abkürzungsverzeichnis

DAF	Druckabfall
D-BARE	D-Bank-Regeleinrichtung
DE	Dampferzeuger
DEHEIRO	Dampferzeuger-Heizrohrleck
DHF	Druckhalterfüllstand
FAGEB	Fahrgeschwindigkeitsbegrenzung
FD-AA	Frischdampfabschlussarmatur
FDU	Frischdampfumleitstation
KMD	Kühlmitteldruck
KMM	Kühlmittelmasse
KS	Komponentenschutz
LAW-EB	Lastabwurf-Eigenbedarf
RELEB	Begrenzung der Reaktorleistung
MADTEB	Kühlmittel-Massen-, Druck- und Temperaturgradienten Begrenzung
ND / HD	Niederdruck / Hochdruck
PERG	erlaubte Generatorleistung
PRIPERL	Primär erlaubte Reaktorleistung
RDB	Reaktordruckbehälter
RESA / RESAK	Reaktorschnellabschaltung; RESAK = RESA-Kontrolle
SE	Sicherheitsebene
SPW	Speisewasser
STAFAB	Steuerstabfahrbegrenzung
STEW	Steuerstabeinwurf
TA-, TW-System	TA = Volumenregelsystem; TW = Zusatzboriersystem
TB-, TH-System	TB = Chemikalieneinspeisesystem; TH = Nachkühlsystem
UGS	Untergruppensteuerung
YP	Druckhalter- und Abblasesystem

**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