Alexander Kratzsch

Wissensbasierte Modellierung von Transportvorgängen bei partikelbelasteter Strömung in SWR nach Kühlmittelverluststörfällen

Beiträge aus der Automatisierungstechnik

Alexander Kratzsch

Wissensbasierte Modellierung von Transportvorgängen bei partikelbelasteter Strömung in SWR nach Kühlmittelverluststörfällen

VOGT

Dresden 2010

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibiograpic data is available in the internet at http://dnb.ddb.de.

Zugl.: Freiberg, Techn. Univ. Bergakademie, Diss., 2009

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Wissensbasierte Modellierung von Transportvorgängen bei partikelbelasteter Strömung in SWR nach Kühlmittelverluststörfällen“
von Alexander Kratzsch überein.

© Jörg Vogt Verlag 2010
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-31-1

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Wissensbasierte Modellierung von Transportvorgängen bei partikelbelasteter Strömung in SWR nach Kühlmittelverluststörfällen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor – Ingenieur

Dr. – Ing.

vorgelegt

von Dipl. – Ing. (FH) Alexander Kratzsch

geboren am 28.08.1979 in Freiberg

Gutachter: Prof. Dr. –Ing. habil. Peter Löber, Freiberg

Prof. Dr. –Ing. habil. Rainer Hampel, Zittau

Dr. rer. nat. Uwe Gall, Hamburg

Freiberg, den 24.11.2009

Veröffentlicht als Dissertationsschrift!

DANKSAGUNG

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik an der Hochschule Zittau/Görlitz und wurde durch ein von der Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH vergebenes Promotionsstipendium gefördert.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. – Ing. habil. Peter Löber für das entgegengebrachte Interesse an der Themenstellung. Herr Prof. Dr. – Ing. habil. Rainer Hampel danke ich für die wissenschaftliche Förderung sowie für die vielen konstruktiven Diskussionen bei der Anfertigung des Manuskriptes. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr. rer. nat. Uwe Gall sowie bei Herrn Hermann Ohlmeyer für die gute Betreuung seitens der Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH.

Ebenso bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Institutes für das gute Arbeitsklima und die konstruktive Zusammenarbeit. Insbesondere bedanke ich mich bei Prof. Dr. – Ing. Wolfgang Kästner für die intensive wissenschaftliche Betreuung und die kritische Diskussion bei der Erstellung des Manuskriptes.

Für Doreen

„Es irrt der Mensch, solang er strebt.“

(Johann Wolfgang von Goethe)

Kurzreferat

Die vorliegende Dissertationsschrift ordnet sich an der Schnittstelle der Wissenschaftszweige Automatisierungstechnik und Reaktorsicherheitsforschung ein. Gegenstand der Untersuchungen ist die Entwicklung verbesserter und effizienter Modelle für die Beschreibung von partikelbelasteten Kühlmittelströmungen in einem Siedewasserreaktor nach einem Kühlmittelverluststörfall. Insbesondere wird der Einfluss des freigesetzten Isolationsmateriales auf den Differenzdruck an den Rückhaltevorrichtungen des Not-/Nachkühlsystems in einem Siedewasserreaktor in Folge eines postulierten Kühlmittelverluststörfalles untersucht.

Ausgehend von der Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik erfolgt die Entwicklung eines Gesamtmodells zur Berechnung des Differenzdruckes über den Rückhaltevorrichtungen. Das Gesamtmodell ist modular aufgebaut. Jedes der drei Module charakterisiert, ausgehend von der Freisetzung über den Transport des Isolationsmateriales in der Kondensationskammer und im Steuerstabsantriebsraum bis hin zum Differenzdruckaufbau an den Rückhaltevorrichtungen, ein wesentliches Phänomen des Isolationsmaterialverhaltens. Es wurde die Prozessspezifik eines Kühlmittelverluststörfalls eingehend analysiert. Das entwickelte Gesamtmodell berücksichtigt die Nichtlinearitäten der physikalischen Vorgänge. Das Differenzdruckmodell wurde mit Hilfe der Methode der Künstlichen Neuronalen Netze auf Grundlage einer experimentellen Datenbasis erstellt. Weiterhin wird die Kaskadierung des Differenzdruckmodelles mit dem Ziel der Visualisierbarkeit im dreidimensionalen Merkmalsraum durchgeführt. Anhand der Gewichtsanalyse erfolgt die physikalische Verifikation der kompakten und kaskadierten Differenzdruckmodellstruktur.

Mit Hilfe des Gesamtmodells ist erstmals die geschlossene Berechnung des Differenzdruckes an den Rückhaltevorrichtungen der Not-/Nachkühlstränge im Ergebnis eines postulierten Kühlmittelverluststörfalles möglich. Die Simulationszeit des Gesamtmodells wurde im Vergleich zu komplexen dreidimensionalen numerischen Simulationscodes deutlich reduziert. Das Gesamtmodell wurde erfolgreich auf ein postuliertes Kühlmittelverluststörfallszenario für einen Siedewasserreaktor angewendet.

Inhaltsverzeichnis:

1 Einleitung und Problemstellung 1

2 Stand von Wissenschaft und Technik 5

2.1 Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik für Modellierungs- und Simulationsmethoden auf dem Gebiet der Reaktorsicherheitsforschung 5

2.1.1 Einführung 5

2.1.2 Theoretische Systemanalyse 6

2.1.3 Experimentelle Systemanalyse 7

2.1.4 Simulationsmethoden in der Reaktorsicherheitsforschung 7

2.2 Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik für den Kühlmittelverluststörfall mit Freisetzung von Isolationsmaterial 9

2.2.1 Freisetzung von Isolationsmaterial 9

2.2.2 Transport des freigesetzten Isolationsmaterials 10

2.2.3 Differenzdruckaufbau an Rückhaltevorrichtungen 12

2.3 Schlussfolgerungen aus der Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik 14

3 Zielstellung und Abgrenzung der Arbeit 17

4 Beschreibung des Gesamtmodells für die Modellierung einer partikelbelasteten Kühlmittelströmung 21

4.1 Vorgehensweise bei der Modellierung 21

4.2 Modellierung des Gesamtmodells 22

5 Modul I „Freisetzung“ 23

6 Modul II „Transport“ 25

6.1 Modulbeschreibung 25

6.2 Teilmodell „Kondensationskammer“ 25

6.2.1 Sicherheitstechnische Relevanz der Kondensationskammer eines SWR bei einem KMV – Störfall 25

6.2.2 Strömungsverhältnisse in der Kondensationskammer 27

6.2.3 Modell zur Berechnung der angesaugten Isolationsmaterialmasse aus der Kondensationskammer 30

6.2.4 Bewertung der Modellgüte 42

6.3 Teilmodell „Steuerstabsantriebsraum“ 46

6.3.1 Sicherheitstechnische Relevanz des Steuerstabsantriebsraums 46

6.3.2 Strömungsverhältnisse im Steuerstabsantriebsraum 47

6.3.3 Modellierungskonzept 48

6.3.4 Bewertung der Modellgüte 57

6.4 Zusammenfassung zum Abschnitt 6 59

7 Modul III „Differenzdruck“ 61

7.1 Einführung 61

7.2 Modulbeschreibung 63

7.3 Grundlagen Künstlicher Neuronaler Netze 64

7.3.1 Feed – Forward – Netzwerke 64

7.3.2 Die Backpropagation Lernregel 67

7.3.3 Vorgehensweise bei der Erstellung eines Modells mit Hilfe Künstlicher Neuronaler Netze 70

7.3.4 Modellierungsumgebung 71

7.4 Das kompakte KNN – Differenzdruckmodell 71

7.4.1 Beschreibung der Datenbasis 71

7.4.2 Erstellung des kompakten KNN – Differenzdruckmodells 75

7.4.3 Nachweis der Generalisierungsfähigkeit des Kompaktmodells 78

7.4.4 Zusammenfassung zu Abschnitt 7.4 80

7.5 Erweiterte Analyse des kompakten KNN – Differenzdruckmodells 82
7.5.1 Einführung in die Methode der Gewichtsanalyse 82
7.5.2 Anwendung der Gewichtsanalyse auf das kompakte Differenzdruckmodell .. 84
7.5.3 Nachweis der Sinnfälligkeit der Gewichtsanalyse 85
7.5.4 Zusammenfassung zu Abschnitt 7.5 87
7.6 Kaskadierung von KNN – Modellen 87
7.6.1 Zielstellung 87
7.6.2 Stand von Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Kaskadierung bei Soft Computing – Modellen 88
7.6.3 Ableitung der Berechnungsvorschrift für die virtuelle Zwischengröße 88
7.6.4 Erstellung und Validierung des kaskadierten KNN – Differenzdruckmodells 92
7.6.5 Validierung des kaskadierten KNN – Differenzdruckmodells für beliebige Kombinationen von Eingangsgrößen 98
7.6.6 Herleitung der Berechnungsvorschrift für die Gewichtsanalyse kaskadierter KNN – Modelle 101
7.6.7 Anwendung der Gewichtsanalyse auf das kaskadierte KNN – Differenzdruckmodell 103
7.6.8 Zusammenfassung zu Abschnitt 7.6 103
7.7 Weiterführende Untersuchungen zu dem kompakten und kaskadierten KNN – Differenzdruckmodell 104
7.7.1 Grenzen des KNN – Differenzdruckmodells 104
7.7.2 Vergleich des KNN – Differenzdruckmodells mit dem Differenzdruckmodell auf Grundlage der Davies/Ergun – Gleichung 105
7.7.3 Untersuchung der Übertragbarkeit beider Modellstrukturen auf andere Geometrien von Rückhaltevorrichtungen 107
7.7.4 Zusammenfassung zu Abschnitt 7.7 112
7.8 Berücksichtigung der Filterbettstruktur 112
7.9 Zusammenfassung zum Abschnitt 7 115

8 Anwendung des entwickelten Modells auf ein postuliertes Szenario eines Kühlmittelverluststörfalles für das Kernkraftwerk Brunsbüttel 117

8.1 Einführung 117

8.2 Vergleich der Änderungen des Differenzdruckes an den Rückhaltevorrichtungen für die Kombinationen I bis IV 118

8.3 Vergleich der Änderungen des Differenzdruckes an den Rückhaltevorrichtungen für die Kombinationen II und VI 119

8.4 Vergleich der Änderungen des Differenzdruckes an den Rückhaltevorrichtungen für die Kombinationen II und V 121

8.5 Zusammenfassung zum Abschnitt 8 124

9 Zusammenfassung und Ausblick 127

10 Anhänge 131

A. Kurzbeschreibung eines Kühlmittelverluststörfalls in einem Siedewasserreaktor 132

B. Korrelationsanalyse der Gesamtdatenbasis 134

C. Kurzbeschreibung des Moduls I „Freisetzung“ 136

D. Kurzbeschreibung des Moduls II „Transport“ 137

E. Kurzbeschreibung des Moduls III „Differenzdruck“ 138

F. Versuchsstand „Ringleitung II“ 140

G. Versuchsstand „Zittauer Strömungswanne“ 142

H. Versuchsstand „Porosität“ 143

I. Störfallszenario 145

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1-1 Fotografie des in Kernkraftwerken zur Isolierung von Rohrleitungen eingesetzten faserförmigen Isolationsmateriales 1

Abbildung 1-2 Schematische Darstellung der Strömungspfade im Sicherheitsbehälter eines Siedewasserreaktors nach einem Kühlmittelverluststörfall [KKB07] 2

Abbildung 2-1 Grafische Veranschaulichung des Systembegriffs [KAH04] 5

Abbildung 2-2 Grafische Darstellung der Unterteilung in die theoretische und experimentelle Systemanalyse 6

Abbildung 2-3 Einordnung der Simulationsmethoden in der Reaktorsicherheitsforschung zur theoretischen und experimentellen Systemanalyse 8

Abbildung 2-4 Schematische Darstellung der Transportvorgänge in der Kondensationskammer eines Siedewasserreaktors [IPM07] 11

Abbildung 2-5 Schematische Darstellung der existierenden Modellansätze für die Modellierung von partikelbelasteten Kühlmittelströmungen 15

Abbildung 3-1 Einordnung der entwickelten Modellansätze in die bisherigen existierenden Modellklassen 18

Abbildung 3-2 Schematische Darstellung des Ansatzes zur integrierten Bearbeitung der Sumpfproblematik (vorgeschlagen von der GRS) 19

Abbildung 4-1 Visualisierung der Vorgehensweise bei der Entwicklung des Gesamtmodells 21

Abbildung 4-2 Modellierung des Gesamtmodells 22

Abbildung 5-1 Schematische Darstellung des Moduls I „Freisetzung“ 23

Abbildung 5-2 Veranschaulichung der Philosophie der Modellierung der Freisetzung von Isolationsmaterial in einem SWR nach einem KMV – Störfall .. 23

Abbildung 6-1 Schematische Darstellung des Moduls II „Transport“ 25

Abbildung 6-2 Beispielhafte schematische Darstellung der Einbindungsstellen des TH- und TK – Systems in die Kondensationskammer des KKB (Draufsicht) 26

Abbildung 6-3 Beispielhafte Darstellung des quasi – stationären Grundströmungsfeldes in der Kondensationskammer für KKB (alle Stränge des Not-/Nachkühlsystems in Betrieb) 28

Abbildung 6-4 Schematische Darstellung des Teilmodells „Koka“ für die Notkühlphase I und II 31

Abbildung 6-5 Vorgehensweise bei der Berechnung der angesaugten Isolationsmaterialmasse (Drei – Phasen – Methode) 33

Abbildung 6-6 Bahnlinien mit Startpunkten in *2* konzentrischen Kreisen an der Wasseroberfläche der Kondensationskammer des KKB bei aktiviertem TK – System 34

Abbildung 6-7 Darstellung der Schwerkraft – Querstrom – Klassierung 35

Abbildung 6-8 Bahnlinien mit Startpunkten in zwei konzentrischen Kreisen an der Wasseroberfläche der Kondensationskammer des KKB bei aktiviertem TK – System und einer überlagerten Sinkgeschwindigkeit $w_S = 0{,}004\ m/s$ 36

Abbildung 6-9 Beispielhafte Darstellung des Ansaugkegels bei einer Sinkgeschwindigkeit von *0,004 m/s* bei in Betrieb befindlichem TK – System im KKB 37

Abbildung 6-10 Beispielhafte Darstellung des angesaugten Anteils von Isolationsmaterialfragmenten in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit für das TK – System im KKB 39

Abbildung 6-11 Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Berechnung der an der Rückhaltevorrichtung angelagerten Isolationsmaterialmasse 41

Abbildung 6-12 Postulierte Sinkgeschwindigkeitsverteilungen der Isolationsmaterialfragmente für die Sensibilitätsanalyse des Teilmodells „Koka“, Variante I bis III 43

Abbildung 6-13 Darstellung der Massenbelegung an der RV in Abhängigkeit von der Zeit in Szenario A für die Varianten I bis III 44

Abbildung 6-14 Darstellung der Massenbelegung an der RV in Abhängigkeit von der Zeit bei drei in Betrieb befindlichen Strängen des Not-/Nachkühlsystems in Szenario B für die Varianten I bis III 45

Abbildung 6-15 Beispielhafte schematische Darstellung der Einbindungen des TH - Systems in den Steuerstabsantriebraum des KKB (Draufsicht) 46

Abbildung 6-16 Darstellung der turbulenten kinetischen Energie der Wasserphase im SAR während der Rückförderung in die Koka (zwei Notkühlstränge in der Betriebsweise „Rückfördern“) 48

Abbildung 6-17 Schematische Darstellung des Teilmodells „SAR“ des Moduls II 49

Abbildung 6-18 Veranschaulichung der Philosophie der Modellierung der angesaugten Isolationsmaterialmasse aus dem SAR eines SWR 51

Abbildung 6-19 Schematische Darstellung des geometrischen Aufbaus eines SAR – Sumpfes (*2D*) 52

Abbildung 6-20 Schematische Darstellung des Füllstandmodells für den SAR 52

Abbildung 6-21 Volumen – Füllstands – Kurve des SAR für das KKB 53

Abbildung 6-22 Schematische Darstellung des nodalisierten SAR – Modells für die Bestimmung der Isolationsmaterialschichtung 54

Abbildung 6-23 Schematische Darstellung des Sedimentationsprozesses zwischen 2 Nodes 55

Abbildung 6-24 Schematische Darstellung der Lage und Höhe der Einbindung eines Notkühlstranges im SAR – Boden (bezogen auf die vertikale Symmetrieachse) 56

Abbildung 6-25 Darstellung des Partikelvolumenanteils im Node $n = 0$ in Abhängigkeit von der Zeit für die Varianten A bis D 58

Abbildung 7-1 Anlagerungsverhalten von Isolationsmaterialfragmenten an einer horizontalen Rückhaltevorrichtung (VS RL II) bei einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0{,}05$ *m/s* [IPM07] 61

Abbildung 7-2 Schematische Darstellung eines Filterbettes auf einer Rückhaltevorrichtung unter Angabe der wesentlichen Parameter.....62

Abbildung 7-3 Schematische Darstellung des Moduls III „Differenzdruck“ 63

Abbildung 7-4 Allgemeine Struktur eines Feed – Forward – Netzwerkes [KNI07] ..64

Abbildung 7-5 Schematische Darstellung eines Neurons.....66

Abbildung 7-6 Funktionsverlauf der Transferfunktion PARABOLA 66

Abbildung 7-7 Fiktive Fehlerfläche eines Künstlichen Neuronalen Netzes als Funktion der Gewichte w_1 und w_2 [ZEL97] 67

Abbildung 7-8 Prinzip des überwachten Lernens eines Feed – Forward – Netzwerkes [ZEL97] 68

Abbildung 7-9 Schematische Darstellung der Entwurfsphasen.....70

Abbildung 7-10 Schematische Darstellung der Zerlegung der Gesamtdatenbasis in die Trainings- und die Testdatenbasis 72

Abbildung 7-11 Schematische Darstellung der Netzstruktur für das kompakte Differenzdruckmodell.....76

Abbildung 7-12 Darstellung des experimentell ermittelten Differenzdruckes *dp* über dem Index im Vergleich zu dem durch das kompakte KNN – Differenzdruckmodell berechneten Differenzdruckes *dp_MLP* (Trainingsphase) 77

Abbildung 7-13 Darstellung des maximalen und mittleren Trainingsfehlers über dem Index 78

Abbildung 7-14 Darstellung des Differenzdruckes *dp* (Testdatensatz) über dem Index im Vergleich zu dem vom kompakten KNN – Differenzdruckmodell berechneten Differenzdruck *dp_MLP* (Testphase).....79

Abbildung 7-15 Darstellung des maximalen und mittleren Testfehlers über dem Index 80

Abbildung 7-16 Schematische Darstellung der Realisierung der Modellgleichung in einer Simulationsumgebung 82

Abbildung 7-17 Schematische Darstellung einer beispielhaften Netzarchitektur mit den einzelnen gewichteten Verbindungen 83

Abbildung 7-18 Darstellung des Differenzdruckes in Abhängigkeit der Massenbelegung bei $v = 14\ cm/s$ und $T = 45\ °C$ für beide Kompaktmodelle 86

Abbildung 7-19 Schematische Darstellung der Kaskadierungsmöglichkeiten des kompakten KNN – Differenzdruckmodells 89

Abbildung 7-20 Schematische Darstellung der Netzstruktur für das kaskadierte Differenzdruckmodell 92

Abbildung 7-21 Gegenüberstellung des Kennfeldes vom Trainingsdatensatz (rot) und des vom kaskadierten KNN – Differenzdruckmodell reproduzierten Kennfeld (gelb) für die erste Kaskade 93

Abbildung 7-22 Darstellung der absoluten Fehlerkennfläche zwischen den beiden Kennfeldern aus Abbildung 7-21 für die erste Kaskade 94

Abbildung 7-23 Gegenüberstellung des Kennfeldes vom Testdatensatz (rot) und des vom kaskadierten KNN – Differenzdruckmodell reproduzierten Kennfeld (gelb) für die erste Kaskade 94

Abbildung 7-24 Darstellung der absoluten Fehlerkennfläche zwischen den beiden Kennfeldern aus Abbildung 7-23 für die erste Kaskade 95

Abbildung 7-25 Gegenüberstellung des Kennfeldes vom Trainingsdatensatz (rot) und des vom kaskadierten KNN – Differenzdruckmodell reproduzierten Kennfeldes (gelb) für die zweite Kaskade 95

Abbildung 7-26 Darstellung der absoluten Fehlerkennfläche zwischen den beiden Kennfeldern aus Abbildung 7-25 für die zweite Kaskade 96

Abbildung 7-27 Gegenüberstellung des Kennfeldes vom Testdatensatz (rot) und des vom kaskadierten KNN – Differenzdruckmodell reproduzierten Kennfeld (gelb) für die zweite Kaskade 97

Abbildung 7-28 Darstellung der absoluten Fehlerkennfläche zwischen den beiden Kennfeldern aus Abbildung 7-27 für die zweite Kaskade 97

Abbildung 7-29 Darstellung der Eingangsgrößen *MB*, *v* und *T* in Abhängigkeit von der Zeit mit unterschiedlichen Amplituden 99

Abbildung 7-30 Darstellung des Kennfeldes der Gesamtdatenbasis (rot) für die beiden Kaskaden und der zugehörigen Modellbahnen für die sinusförmigen Eingangsgrößen 100

Abbildung 7-31 Schematische Darstellung einer kaskadierten Modellstruktur..... 101

Abbildung 7-32 Darstellung des Differenzdruckes in Abhängigkeit der Zeit, vergleichend für den gemessenen Differenzdruck, den mit dem Davies/Ergun- und dem KNN – Differenzdruckmodell berechneten Differenzdruck 105

Abbildung 7-33 Darstellung des Differenzdrucks in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit, vergleichend für die Messwerte, das kompakte KNN – Differenzdruckmodell und das *Davies/Ergun* – Differenzdruckmodell 106

Abbildung 7-34 Darstellung des experimentell bestimmten Differenzdruckes in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit bei einer Fluidtemperatur von *50 °C* und einer Massenbelegung von *1,23 kg/m²* 108

Abbildung 7-35 Ergebnis der Nachrechnung der experimentellen Ergebnisse durch das kompakte und das kaskadierte KNN - Differenzdruckmodell 109

Abbildung 7-36 Verlauf der Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für das Experiment am VS „Zittauer Strömungswanne“..... 110

Abbildung 7-37 Ergebnis der Nachrechnung des Experimentes am VS ZSW für zeitabhängige Eingangsgrößen (kompaktes/kaskadiertes KNN – Differenzdruckmodell) 110

Abbildung 7-38 Darstellung des Kennfeldes der Gesamtdatenbasis (rot) für die beiden Kaskaden und der zugehörigen Modellbahnen (blau) für die zeitabhängigen Eingangsgrößen 111

Abbildung 7-39 Darstellung der Porosität eines Filterbettes in Abhängigkeit von dem Differenzdruck für das Isolationsmaterial MDK (Isolationsmaterialgesetz) 113

Abbildung 7-40 Schematische Modellstruktur des an das kaskadierte bzw. das kompakte KNN - Differenzdruckmodell angekoppelte Modell zur Berechnung des Differenzdrucks unter Variation der Porosität 114

Abbildung 8-1 Zeitlicher Verlauf der normierten Änderungen des Differenzdruckes an der RV der Nachkühlstränge TH20 und TH30 sowie TK in KKB (Kombinationen I bis IV) 118

Abbildung 8-2 Zeitlicher Verlauf der normierten Änderungen des Differenzdruckes an der RV für die Nachkühlstränge TH20 und TH30 sowie TK (Kombinationen II und VI) 120

Abbildung 8-3 Zeitlicher Verlauf der normierten Änderungen des Differenzdruckes an der RV für die Nachkühlstränge TH20 und TH30 sowie TK (Kombinationen II und V) 122

Abbildung 8-4 Partikelvolumenanteil in Abhängigkeit von der Zeit für das erste Node des SAR (Kombination II und V) 123

Abbildung 9-1 Übersicht über die entwickelten Methoden und Werkzeuge 129

Abbildung 10-1 Schematische Darstellung des Moduls I „Freisetzung“ 136

Abbildung 10-2 Schematische Darstellung des Moduls II „Transport“ 137

Abbildung 10-3 Schematische Darstellung des Moduls III „Differenzdruck“ 138

Abbildung 10-4 Schematische Darstellung des Versuchsstands „*Ringleitung II*“ [STE08] 140

Abbildung 10-5 Schematische Darstellung des Versuchsstandes Zittauer Strömungswanne [STE08] 142

Abbildung 10-6 Schematische Darstellung des Versuchsstands „*Porosität*“ [IPM07] 143

Abbildung 10-7 Prinzip der Kompaktierungsversuche am Versuchsstand „*Porosität*“ [GRA05] 144

Abbildung 10-8 Temperaturänderung des Kühlmittels in der Kondensationskammer in Abhängigkeit von der Zeit für die Leckstelle 0,1F – Leck RA 31 Z 101 146

Abbildung 10-9 Verteilung der Sinkgeschwindigkeit der Isolationsmaterialfragmente in der Kondensationskammer, Variante A 149

Abbildung 10-10 Verteilung der Sinkgeschwindigkeit der Isolationsmaterialfragmente in der Kondensationskammer, Variante B 150

Abbildung 10-11 Experimentell bestimmter relativer Partikelanteil in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit für das Isolationsmaterial MDK 151

Abbildung 10-12 Darstellung der Sinkgeschwindigkeit der Isolationsmaterialfragmente im SAR in Abhängigkeit von der Zeit 152

Abbildung 10-13 Darstellung des Isolationsmaterialvolumenstromes in den SAR in Abhängigkeit von der Zeit 153

Abbildung 10-14 Übersicht über die Kombination der Variationsparameter aus Tabelle 10-8 153

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 6-1 Übersicht über die Sinkgeschwindigkeitsklassen der Isolationsmaterialfragmente [FIS05] [SEE07] 32

Tabelle 6-2 Zusammenstellung der Koeffizienten A – D der WEIBULL – Ersatzmodelle für die zur Verfügung stehenden Stränge des Not- und Nachkühlsystems beispielhaft für KKB 40

Tabelle 6-3 Randbedingungen für die Sensibilitätsanalyse des Teilmodells „Koka“, Szenario A 42

Tabelle 6-4 Randbedingungen für die Sensibilitätsanalyse des Teilmodells „Koka“, Szenario B 42

Tabelle 6-5 Zusammenstellung der Eingangsmerkmale für das Teilmodell „SAR“ des Moduls II 50

Tabelle 6-6 Zusammenstellung der Ausgangsmerkmale für das Teilmodell „SAR“ des Moduls II 50

Tabelle 6-7 Übersicht über die Randbedingungen der Sensibilitätsanalyse des Teilmodells „SAR“, Modul II 58

Tabelle 7-1 Übersicht über die Merkmale der Gesamtdatenbasis 72

Tabelle 7-2 Übersicht über die Merkmale der Trainingsdatenbasis 73

Tabelle 7-3 Übersicht über die Merkmale der Testdatenbasis 73

Tabelle 7-4 Empirische Korrelationskoeffizienten zwischen den Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße der Gesamtdatenbasis. 74

Tabelle 7-5 Empirische Korrelationskoeffizienten zwischen den Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße der Trainingsdatenbasis 75

Tabelle 7-6 Empirische Korrelationskoeffizienten zwischen den Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße der Testdatenbasis 75

Tabelle 7-7 Übersicht über weitere relevante Trainingsparameter für das Kompaktmodell 76

Tabelle 7-8 Übersicht über die absoluten und relativen Trainingsfehler des kompakten KNN – Differenzdruckmodells 77

Tabelle 7-9 Übersicht über die absoluten und relativen Testfehler 79

Tabelle 7-10 Beschreibung der Koeffizienten für Gleichung 7-9 81

Tabelle 7-11 Vergleich zwischen der Gewichtskorrelation des Kompaktmodells und der empirischen Korrelation des Trainingsdatensatzes 84

Tabelle 7-12 Übersicht über die absoluten und relativen Trainingsfehler des modifizierten kompakten Differenzdruckmodells 85

Tabelle 7-13 Vergleich der empirischen Korrelation der Trainingsdaten mit der Gewichtskorrelation des modifizierten kompakten KNN – Differenzdruckmodells 86

Tabelle 7-14 Zusammenstellung der Modellierungsfehler für die erste und zweite Kaskade des kaskadierten KNN – Differenzdruckmodells im Vergleich zum kompakten KNN – Differenzdruckmodell 93

Tabelle 7-15 Vergleich der resultierenden Gewichtsanalyse des kaskadierten Differenzdruckmodells mit dem Kompaktmodell und der empirischen Korrelation der Trainingsdatenbasis 103

Tabelle 7-16 Übersicht über die experimentell ermittelten Koeffizienten für das Isolationsmaterialgesetz für MDK 113

Tabelle 8-1 Zusammenstellung der Kombinationen I bis VI für die Sensibilitätsanalyse des Gesamtmodells 117

Tabelle 8-2 Übersicht über die maximalen prozentualen Differenzdruckänderungen an der RV zum Zeitpunkt $t = 12000\ s$ für die Kombinationen I bis IV 119

Tabelle 8-3 Übersicht über die maximalen prozentualen Differenzdruckänderungen an den RV zum Zeitpunkt $t = 12000\ s$ für die Kombinationen II und VI 120

Tabelle 10-1 Vergleich der empirischen und partiellen Korrelationskoeffizienten bezüglich der Datenkorrelation zwischen den Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße der Gesamtdatenbasis 134

Tabelle 10-2 Empirische Korrelationskoeffizienten zwischen den Eingangsgrößen der Gesamtdatenbasis. 135

Tabelle 10-3 Übersicht über die Parameter und Ausgangsgrößen des Moduls I „Freisetzung“ 136

Tabelle 10-4 Übersicht über die Eingangs- und Ausgangsgrößen des Moduls II „Transport“ 137

Tabelle 10-5 Übersicht über die Ein- und Ausgangsgrößen des Moduls III 138

Tabelle 10-6 Übersicht über die in Betrieb befindlichen Not-/Nachkühlstränge unterteilt nach den Notkühlphasen I und II für das gewählte Beispielszenario 145

Tabelle 10-7 Zusammenstellung aller Parameter für die Simulationsrechnung des Beispielszenarios 148

Tabelle 10-8 Zusammenstellung aller Parameter/Randbedingungen, die einer Variation unterliegen 148

Tabelle 10-9 Zusammenstellung der Kombinationen I bis VI für die Sensibilitätsanalyse 154

Abkürzungsverzeichnis:

BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CFD	Computational Fluid Dynamics
DB	Darstellungsbereich
DGL	Differentialgleichung
FFN	Feed – Forward – Netzwerke
FKZ	Förderkennzeichen
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
KKB	Kernkraftwerk Brunsbüttel
KMV	Kühlmittelverlust
KNN	Künstliche Neuronale Netze
Koka	Kondensationskammer
MDK	Bezeichnung des Isolationsmaterials
NK	Notkühlphasen
ORR	oberer Ringraum
PSS	Pumpensaugsieb
RA	Frischdampfleitung
RDB	Reaktordruckbehälter
RV	Rückhaltevorrichtung
SAR	Steuerstabantriebraum
SB	Sicherheitsbehälter

SHB	Sicherheitsbehälter
SWR	Siedewasserreaktor
TH10, TH20, TH30, TH40	Stränge des Notkühlsystems
TK	Kernflutsystem
URR	unterer Ringraum
VFK	Volumen – Füllstands – Kurve
VS	Versuchsstand
VS RL II	Versuchsstand „Ringleitung II“
ZSW	Zittauer Strömungswanne

Formelzeichenverzeichnis:

$\underline{A}$	Systemmatrix
$\bar{k}$	mittlere turbulente kinetische Energie
$\bar{k}_n$	mittlere Transportrate im Node n
$\dot{m}_{ab}$	Massenstrom aus der Kondensationskammer
$\vec{U}_{Partikel}$	Geschwindigkeitsvektor eines Partikels
$\tilde{y}_V$	nichtlineare virtuelle Zwischengröße
A, B, C, D	Koeffizienten der WEIBULL – Ersatzmodelle
a, a_0	Koeffizienten der *Davies/Ergun* - Differenzdruckgleichung
A_{ij}	Aktivierung eines Neurons
A_{RLII}	Fläche der Rückhaltevorrichtung am Versuchsstand „Ringleitung II“
A_{RV}	Fläche einer Rückhaltevorrichtung
A_S	innere Oberfläche des Isolationsmaterials
A_{ZSW}	Fläche der Rückhaltevorrichtung am Versuchsstand „Zittauer Strömungswanne“
$A_{Zylinder}$	Grundfläche eines Zylinders
b	Koeffizient der *Davies/Ergun* - Differenzdruckgleichung
B_F	Biasvektor der ersten verdeckten Schicht
B_{ji}	Biaswert eines Neurons
B_S	Biasvektor der zweiten verdeckten Schicht

B_T	Biasvektor der Ausgangsschicht
c	Abscheiderate
D	Durchmesser
$D^{<G>}$	Gesamtdatenbasis
$D^{<Test>}$	Testdatenbasis
$D^{<Train>}$	Trainingsdatenbasis
d_i	Innendurchmesser
dp	Differenzdruck
dp_MLP	vom KNN – Differenzdruckmodell berechneter Differenzdruck
F	Fehler
$\underline{F}$	Gewichtsmatrix zwischen Eingangs- und erster verdeckter Schicht
G	Wichtungsfaktor
$\underline{G}$	Gewichtsfaktor
h_{Node}	Höhe eines Nodes
h_{SAR}	Füllstand im Steuerstabsantriebraum
$h_{Schüttbett}$	Höhe eines Schüttbettes (Filterbettes)
I	turbulente Intensität
i	Partikelklassen
J_P	Isolationsmaterialvolumenstrom
K1	Kaskade eins
K2	Kaskade zwei

k_n	Transportrate im Node n
K_n	Verstärkungsfaktor
K_η	Proportionalitätsfaktor
K_ρ	Proportionalitätsfaktor
L	charakteristische Länge
m	Anzahl der Nodes
$m(t)_i$	an der Rückhaltevorrichtung angelagerte Isolationsmaterialmasse der Partikelklasse i
m_0	in die Kondensationskammer eingetragene Isolationsmaterialmasse
$m_{0,i}$	in die Kondensationskammer eingetragene Isolationsmaterialmasse der Partikelklasse i
m_{an}	angesaugte Isolationsmaterialmasse
MB	Massenbelegung
m_{Frei}	freigesetzte Isolationsmaterialmasse
$m_G(t)$	an der Rückhaltevorrichtung insgesamt angelagerte Masse an Isolationsmaterial
$m_{Isolationsmaterial}$	Trockenmasse von Isolationsmaterial
m_{Sed}	Sedimentationsmasse
n	Bezeichner für ein Node
N	Anzahl der linearen Teilmodelle (Kaskaden)
$O_{erwünscht}$	erwünschter Ausgabewert
O_{ij}	Ausgabewert

O_{KNN}	Ausgabewert des Künstlichen Neuronalen Netzes
Q_{ab}	aus dem Steuerstabsantriebraum abgesaugter Volumenstrom
Q_{Koka}	aus der Kondensationskammer abgesaugter Volumenstrom
Q_W	Kühlmittelvolumenstrom aus dem Leck
Re	Reynoldszahl
Re_d	Partikel – Reynoldszahl
$\underline{S}$	Gewichtsmatrix zwischen erster und zweiter verdeckter Schicht
T	Kühlmitteltemperatur, Zeitkonstante
t	Zeit
$\underline{T}$	Gewichtsmatrix zwischen zweiter verdeckter und Ausgangsschicht
$t_{Eintrag}$	Zeitraum, indem Isolationsmaterial in den Steuerstabsantriebraum eingetragen wird
TF_F	Transferfunktion der ersten verdeckten Schicht
TF_S	Transferfunktion der zweiten verdeckten Schicht
TF_T	Transferfunktion der Ausgangsschicht
T_n	Zeitkonstante
T_{start}	Beginn der Rückförderung aus dem Steuerstabsantriebraum in die Kondensationskammer
U	Strömungsgeschwindigkeit
$\underline{U}$	Vektor der Eingangsgrößen
$ü_{Koka}$	prozentualer Anteil der freigesetzten Isolationsmaterialmasse, die in die Kondensationskammer eingetragen wird

$ü_{SAR}$	prozentualer Anteil der freigesetzten Isolationsmaterialmasse, die in den Steuerstabsantriebraum eingetragen wird
v	Strömungsgeschwindigkeit
$V_{angesaugt}$	Volumen des Ansaugkegels
V_{Frei}	freigesetztes Isolationsmaterialvolumen
V_{Koka}	Kühlmittelvolumen in der Kondensationskammer
$V_{P,trans}$	Transfer - Partikelvolumenstrom
$V_{W,trans}$	Transfer - Kühlmittelvolumenstrom
w_{ij}	Gewicht einer Verbindung eines Künstlichen Neuronalen Netzes
w_S	Sinkgeschwindigkeit
w_{Smax}	maximale Sinkgeschwindigkeit
w_{Smin}	minimale Sinkgeschwindigkeit
x	x – Koordinate
x_P	Anteil von Isolationsmaterialfragmenten
$x_{P,SAR}$	Partikelvolumenanteil im Steuerstabsantriebraum
y	y – Koordinate
y_P	Partikelmassenanteil
$y_{v,1}$, $y_{v,2}$, $y_{v,3}$	virtuelle Zwischengröße
z	z – Koordinate
Δp	Differenzdruck

Δt	Simulationsschrittweite
Ψ	normierter Gewichtsfaktor
ε	Porosität
η	dynamische Viskosität
ρ_{MDK}	Materialdichte des Isolationsmaterials MDK
$\rho_{Packung}$	Packungsdichte einer Isolationsmaterialkassette
ρ_S	Dichte des Isolationsmaterials
τ	Ansaugzeit
ζ	Widerstandsbeiwert
ν	kinematische Viskosität

1 Einleitung und Problemstellung

Aus den Ergebnissen der deutschen Risikostudie [GRS89] geht hervor, dass die genaue Kenntnis von Störfallabläufen in Kernkraftwerken wesentlich zur Sicherheitsbewertung der Anlagen beiträgt. Bei der Bewertung der Reaktorsicherheit werden unterschiedliche Störfälle betrachtet.

Im Jahr 1992 kam es beim Anfahren des schwedischen Kernkraftwerkes Barsebaeck (Siedewasserreaktor (SWR)) zu einem Kühlmittelverluststörfall[1] (KMV – Störfall). Während der Funktionsprüfung ereignete sich ein Fehlöffnen eines Sicherheitsventils einer Frischdampfleitung innerhalb des Sicherheitsbehälters (SHB) [MAQ06][NRC04]. Von den in der Nähe befindlichen Komponenten wurde durch den ausströmenden Dampf Isolationsmaterial (Abbildung 1-1) abgetragen.

Abbildung 1-1 Fotografie des in Kernkraftwerken zur Isolierung von Rohrleitungen eingesetzten faserförmigen Isolationsmateriales

Das Isolationsmaterial gelangte über die Kondensationsrohre in die Kondensationskammer (Koka). Dieser Transport erfolgte aufgrund des Druckausgleiches zwischen der Druckkammer und der Koka gasgetragen [IPM07]. Der Vorfall führte in den folgenden Jahren zu einer intensiven Diskussion bezüglich der Problemstellung von freigesetztem Isolationsmaterial und dessen Auswirkung auf die Sicherstellung der Notkühlung eines Kernkraftwerkes.

In Abbildung 1-2 ist der SHB eines SWR mit einer angenommen Leckstelle und den Strömungspfaden des freigesetzten Kühlmittels (Wasserdampf) schematisch dargestellt.

[1] In der vorliegenden Dissertationsschrift wird ein Kühlmittelverluststörfall mit Freisetzung von Isolationsmaterial betrachtet.

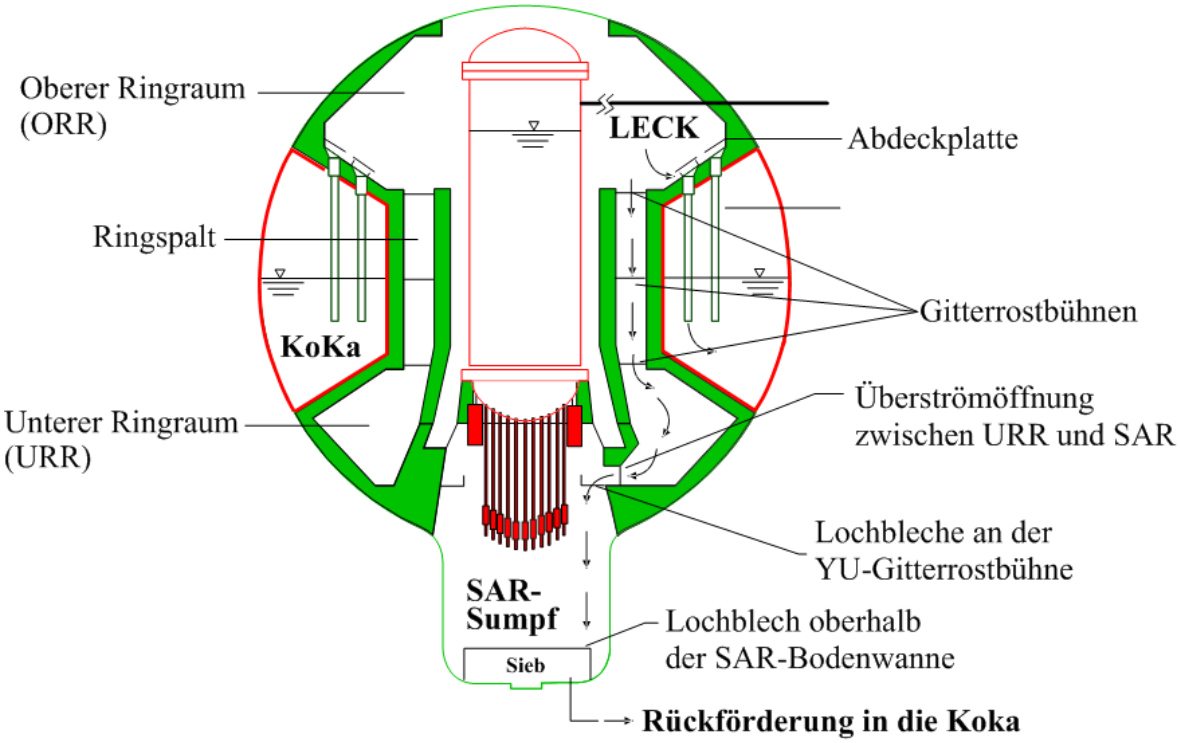

Abbildung 1-2 Schematische Darstellung der Strömungspfade im Sicherheitsbehälter eines Siedewasserreaktors nach einem Kühlmittelverluststörfall [KKB07]

Bei einem KMV – Störfall innerhalb des Sicherheitsbehälters in einem SWR kommt es zum Kühlmittel-/Dampfaustritt an der Leckstelle. Dadurch werden in der Umgebung der Leckstelle die Isolierungen von Komponenten (Rohrleitungen, Armaturen) zerstört. Das Isolationsmaterial wird fragmentiert, bleibt zu einem bestimmten Anteil in der Umgebung der Leckstelle zurück bzw. wird aufgrund der Strömungsverhältnisse entlang der angegebenen Pfade (Abbildung 1-2) gasgetragen in die Koka und gas-/wassergetragen in den Steuerstabantriebsraum (SAR) des SWR transportiert. Um die Abfuhr der Nachzerfallsleistung aus dem Reaktorkern sicherzustellen, wird nach dem KMV – Störfall das Kühlmittelinventar aus der Koka mit Hilfe des Niederdruck Nachkühlsystems in den Reaktordruckbehälter (RDB) gefördert. Dabei werden die in das Wasservolumen der Koka eingetragenen Isolationsmaterialfragmente (Partikel) mit dem Kühlmittel angesaugt. Um zu verhindern, dass die Partikel[2] oder andere Fremdmaterialien (Farbe, Betonstücke) in

[2] Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird der Begriff *Partikel* als Agglomerat aus Isolationsmaterialfasern, welche mit Kühlmittel durchsetzt sind, interpretiert. Aufgrund des Differenzdruckes über dem Partikel erfolgt keine Durchströmung sondern eine Umströmung des Partikels während des Sinkprozesses.

den RDB gelangen, sind Rückhaltevorrichtungen (RV) saugseitig vor den Pumpen der Niederdrucksysteme (Notkühlpumpen) installiert. Bei den Rückhaltevorrichtungen handelt es sich um zylinderförmige Lochbleche, die als Pumpensaugsiebe (PSS) bezeichnet werden. Durch die Ablagerung der Partikel auf den PSS entsteht eine Partikelschicht (Filterbett), die den Druckverlust über dem PSS erhöht. Bei einem genügend dicken bzw. dichten Filterbett kann die Standfestigkeit der PSS nicht sichergestellt werden bzw. die Funktion der Notkühlpumpen ist eingeschränkt. Aufgrund dessen ist die Kenntnis des Differenzdruckes über den RV in einem Kernkraftwerk von sicherheitstechnischer Relevanz. Weiterführende Ausführungen zum Aufbau und Betriebsregime eines SWR sind in [KWS04-1] und [KWS04-2] enthalten.

Bei einem KMV – Störfall handelt es sich um ein Ereignis, welches nicht am realen Kernkraftwerk experimentell untersucht werden kann.

In der vorliegenden Dissertationsschrift werden neuartige Methoden der Modellierung und Simulation entwickelt, die bei der Modellierung von partikelbelasteten Kühlmittelströmungen, die im Zuge eines Kühlmittelverluststörfalles (Anhang A) in einem Siedewasserreaktor (SWR) auftreten können, zum Einsatz kommen. Für das Studium der Folgen eines KMV – Störfalles werden experimentelle und analytische Untersuchungen durchgeführt. Die beschriebenen Phänomene (Entstehung der Isolationsmaterialfragmente, Verhalten der Isolationsmaterialfragmente in wässriger Lösung, Differenzdruckaufbau an den RV), die im Zuge eines KMV – Störfalles auftreten, sind analytisch nicht vollständig beschreibar. Aufgrund dessen kommen für die Bearbeitung der Aufgabenstellung unterschiedliche Modellierungs- und Simulationsmethoden (komplexe dreidimensionale Simulationscodes; Soft Computing – Methoden[3]; analytische Modellierungsmethoden) zur Anwendung.

[3] Ein von Prof. Zadeh geprägter Begriff der die Forschungsgebiete Fuzzy, Neuronale Netze, Expertensysteme, Kontrolltheorie, künstliche Intelligenz usw. beinhaltet. Diese Methoden liefern eine quantitative und interpretierbare Beschreibung von Systemen, bei denen eine klassische Analyse nicht oder nur unter unvertretbar hohem Aufwand möglich ist. [SEI05]